

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公表特許公報 (A)

(11)特許出願公表番号
特表2003-503639
(P2003-503639A)

(43)公表日 平成15年1月28日(2003.1.28)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I
F 0 4 D 13/02

テマコード(参考)
C 3H022
D 4C077
I

A 6 1 M 1/10
E 0 4 D 7/00

500

A 6 1 M 1/10
F 0 4 D 7/00

500

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 99 頁) 最終頁に統ぐ

(21)出願番号	特願2001-507932(P2001-507932)
(86) (22)出願日	平成12年6月30日(2000.6.30)
(85)翻訳文提出日	平成14年1月4日(2002.1.4)
(86)国際出願番号	PCT/US00/18098
(87)国際公開番号	WO01/002724
(87)国際公開日	平成13年1月11日(2001.1.11)
(31)優先権主張番号	60/142, 354
(32)優先日	平成11年7月1日(1999.7.1)
(33)優先権主張国	米国(US)
(31)優先権主張番号	09/356, 662
(32)優先日	平成11年7月19日(1999.7.19)
(33)優先権主張国	米国(US)

(71)出願人 ユニバーシティ・オブ・ピッツバーグ
 アメリカ合衆国ペンシルベニア州15260ピ
 ツツバーグ・ウイリアムピットユニオン
 911

(71)出願人 ナショナル・エアロノーテイクス・アン
 ド・スペース・アドミニストレーション
 アメリカ合衆国バージニア州23681-2199
 ハンプトン・メイルストップ212・ラング
 リーブールバード3・ナサラングリーリサ
 ーチセンター

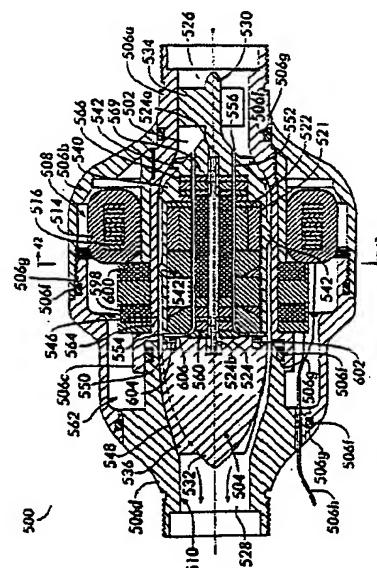
(74)代理人 弁理士 小田島 平吉

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気懸架されたローターを有する血液ポンプ

(57) 【要約】

血液ポンプ（500）は、磁気的に懸架されてハウジング（506）内で回転するローター（502）を持つことが好ましい。ローター（502）は、ハウジング内に配置されたステーター（504）の周りで回転する。ローター（502）を懸架するために、ラジアル磁気軸受（560）がステーター（504）及びローター（502）内に定められる。ラジアル磁気軸受（560）は、ステーター及びローター内に配置された永久磁石を有する受動的磁気軸受又は能動的磁気軸受とすることができる。ポンプ（500）は、受動的磁気軸受又は能動的磁気軸受とすることができる軸方向磁気軸受（562）を更に備える。ローターを駆動するモーターステーター（508）は、モーターステーター（508）により発生した熱をより容易に消散させるためにハウジング内に配置される。ステーター（504）とローター（502）との間に1次流路（552）が定められ、ステーター（504）とローター（502）との間に2次流路（552）が定められる。血液の大部分が1次流路（550）を通過することが好ましい。2次流路（552）は、



【特許請求の範囲】

【請求項1】 血液圧送用のポンプであって、ハウジング、ハウジング内に配置されかつハウジングに結合されたステーター、ハウジング内に配置されかつステーターの周りに懸架されたローターを備え、ローターとステーターとは、ローターとハウジングとの間の1次血液流路及びローターとステーターとの間の2次血液流路を定め、更にローターをステーターとハウジングとの間に懸架するための少なくも2個のラジアル磁気軸受であって、その各がステーター内に配置された少なくも1個のステーター懸架磁石及びローター内に配置された少なくも1個のローター懸架磁石を備え、ステーター懸架磁石とローター懸架磁石とが2次流路を横切って連携している前記少なくも2個のラジアル磁気軸受、及び

ローターをステーターに関して回転させるためのモーターであって、ハウジング内に少なくも1個の電磁コイルを有し、前記電磁コイルがローター内の少なくも1個のローターモーター磁石と連携し、前記連携が、ローターをステーターに関して回転させこれにより血液がポンプを通って圧送されるように1次流路を横切っている前記モーターを備えた血液ポンプ。

【請求項2】 ステーターが、更に、ポンプの入口に配置された第1の端部、ポンプの出口に配置された第2の端部、及び第1の端部と第2の端部とを連結する固定ハブを備える請求項1の血液ポンプ。

【請求項3】 ステーターが、更に、ステーターの第1の端部から伸びている複数のステーターブレード、及びステーターの第2の端部から伸びている複数のステーターブレードを備える請求項2の血液ポンプ。

【請求項4】 モーターが、ハウジング内に配置されたスロットなしモーターステーターを備える請求項1の血液ポンプ。

【請求項5】 ハウジングが、電気・熱伝導率の比較的低い材料よりなる請求項1の血液ポンプ。

【請求項6】 ハウジングがセラミック材料よりなる請求項1の血液ポンプ

ブを有するステーター、

静止ハブとハウジングとの間に懸架されたローター、

ローター内に配置され極性が交互になっていてアウターレースを走める第1組の磁石及びステーターの静止ハブ内に配置され極性が交互になっていてインナーレースを定める第2組の磁石により定められた第1のラジアル磁気軸受であって、静止ハブの周りにローターを懸架するためにインナーレースとアウターレースとが静止ハブとローターとの間の間隙を横切って連携する前記第1のラジアル軸受、

ハウジング内に配置され1対のスラストコイルにより定められたスラスト軸受、及びローター内に配置された1対の磁極であって、ローターをハウジング内で軸方向で位置決めするためにローター上の軸方向の力を作用するようにスラストコイルの各が磁極の一つと交互作用する前記スラスト軸受及び磁極、

ステーター内に配置され、ステーターの軸方向位置を感知する感知用コイル

を備えたポンプ、及び

(ii) ポンプの感知用コイルと組み合わせられ、感知用コイルにより感知された位置に応答してローターを軸方向で位置決めする修正力を作用するために、スラストコイルを通って流れる電流を制御する制御装置を備えた前記システム。

【請求項15】 ポンプが、ローター内に配置され極性が交互になっている第3組の磁石、及びステーター内に配置され極性が交互になっている第4組の磁石を更に備える第2のラジアル磁気軸受を更に備え、第3組の交互磁石と第4組の交互磁石とが第2のラジアル軸受を定めるように間隙を横切って相互作用している請求項14のシステムポンプ。

【請求項16】 ポンプが、ローターを回転させるために、ローター内に配置されたモーター磁石と連携するハウジング内に配置されたモーターを更に備える請求項14のシステム。

【請求項17】 第1組の交互磁石の厚さは、モーター磁石と第1組の交互磁石との間の磁気インターフェースがローター上の望ましくない曲げモーメント

【請求項7】 ハウジングが非磁性ステンレス鋼よりなる請求項1の血液ポンプ。

【請求項8】 ローターモーター磁石が、電磁コイルと相互作用するために永久磁石を備える請求項1の血液ポンプ。

【請求項9】 ステーター懸架磁石の一つが、好ましい懸架位置からローターをずらすモーメントであって、モーター磁石とステーター懸架磁石との相互作用により作られた前記モーメントを減らすために、関係のステーター懸架磁石とモーター磁石との間の磁気的相互作用を減らす厚さを有する請求項1の血液ポンプ。

【請求項10】 ローター磁石は極性が交互になっている複数のリング状磁石を備え、更にステーター磁石は極性が交互になっている複数のリング状磁石を備える請求項1の血液ポンプ。

【請求項11】 ハウジング内に配置されたスラストコイル及びローター内に配置されたスラスト磁極を更に備え、ローターをハウジング内で軸方向で位置決めするために、スラストコイルの一方がスラスト磁極の一方と相互作用そして他方のスラストコイルが他方のスラスト磁極と相互作用する請求項1の血液ポンプ。

【請求項12】 ステーター内に配置された少なくも1個の感知用コイルを更に備え、これがローターの軸方向位置を感知する請求項11の血液ポンプ。

【請求項13】 ハウジング内でローターを軸方向で位置決めするためにスラストコイルがローターに軸方向の力を加えるように、少なくも1個の感知用コイルに応答してスラストコイルを通る電流を制御するためにスラストコイルと相互作用する制御装置を更に備える請求項12の血液ポンプ。

【請求項14】 血液圧送用のシステムであって、

(i) 入口と出口とを有するハウジング、

ハウジング内に配置され、更に入口に配置され周囲に複数のステーターブレードが配置された第1の端部、出口に配置され周囲に複数のステーターブレードが配置された第2の端部、及び第1の端部と第2の端部とを連結する静止ハ

を作らないような厚さである請求項16のシステム。

【請求項18】 制御器が仮想ゼロ電力制御器を備える請求項14のシステム。

【請求項19】 血液圧送用のポンプであって、

入口と出口とを有するハウジング、

ハウジング内に配置され、そして入口の近くでハウジングに結合された第1の端部、及び出口の近くでハウジングに結合された第2の端部を有するステーター、

ステーターとハウジングとの間に磁気的に懸架されたローター、

ローター内に配置されたローター磁石及びステーター内に配置されかつローター磁石と備えられたステーター磁石を有するラジアル磁気軸受であって、ローター磁石とステーター磁石との相互作用がローターをハウジングとステーターとの間で半径方向に懸架している前記ラジアル磁気軸受、

ローターとハウジングとの間に定められた1次流路、

ローターとステーターとの間に定められた2次流路であって、2次流路の適切なフラッシングを提供するに十分に大きくかつローター磁石とステーター磁石とがローターを半径方向で懸架するようにインターフェースできるように十分に小さい前記2次流路を備えるポンプ。

【請求項20】 2次流路を通る流れが、1次流路を通る流れと逆方向である請求項19のポンプ。

【請求項21】 2次流路が、ステーターの第2の端部とローターとの間に配置された入口、ステーターの第2の端部とローターとの間に定められた実質的に内向きの半径方向流路、ステーターとローターとの間に定められた実質的に軸方向流路、及びステーターとローターとの間に定められた出口を備える請求項19のポンプ。

【請求項22】 ハウジング内でローターを軸方向で整列させるための磁気スラスト軸受を更に備える請求項19のポンプ。

【請求項23】 磁気スラスト軸受が能動的磁気軸受を備える請求項22の

ポンプ。

【請求項24】 能動的磁気スラスト軸受がハウジング内に配置された1対のスラストコイルを備え、その各が、ローターに軸方向の力を置くために、ローター内に配置された1対の極の一つと相互作用する請求項23のポンプ。

【請求項25】 能動的スラスト軸受が、ローターの軸方向位置を感知するためにステーター内に配置されたセンサー、及びポンプ内に配置され、ハウジング内でローターを軸方向で位置決めするためにスラストコイルを通って流れている電流を制御する電磁制御器を更に備える請求項24のポンプ。

【請求項26】 血液圧送用のポンプであって、

ハウジング、

ハウジング内に配置されかつハウジングに結合されたステーターであって、

(i) 入口に配置され、周囲に複数のステーターブレードが配置され、かつ第1の直径を有する第1の端部、

(ii) 出口に配置され、実質的に円錐状であり、周囲に複数のステーターブレードが配置され、かつ第1の直径より大きい第2の直径を有する第2の端部、

(iii) 第1の端部を第2の端部に連結し、かつ第2の直径より小さい第3の直径を有する静止ハブ

を備えたステーター、

ハウジング内に配置され、かつ静止ハブの周囲に懸架されるローター、

ステーター内に配置されたステーター磁石とローター内に配置されたローター磁石とにより定められ、ローターをステーターとハウジングとの間に磁気的に懸架するラジアル磁気軸受、

ローターとハウジングとの間に定められている1次血液流路、

ローターとステーターとの間に定められた2次血液流路

を更に備え、1次流路は2次流路より大きくそして2次流路はステーター磁石がローター磁石と相互作用できるように及びポンプを通って流れている血液の剪断ストレスが最小になるように寸法が決められ、更に

ハウジング内に配置され、ローターを回転させこれによりポンプを通る血液を圧送するように1次流路を横切ってローターと連携するモーター

れた円筒状部分を有するローター、

ローターの周囲に配置された複数のインペラーブレードであって、インペラーブレードの各は、実質的に円錐状の端部の周囲の実質的に螺旋状の第1の部分及び実質的に円錐状の端部からローターの円筒状部分上に伸びかつポンプの長手方向軸線と平行な線上に接近するように曲げられている第2の部分を有し、第1の部分は、ローターが回転されたときにポンプを通って流れている血液に圧力エネルギー、回転速度及び軸方向速度を与える、第2の部分は血液に回転運動エネルギーを与えるか血液をステーターブレードに指向させるインペラーブレード、

ステーター内に配置されたステーター磁石及びローター内に配置されたローター磁石により定められた磁気軸受であって、ローターをステーターとハウジングとの間に磁気的に懸架し、更にステーター磁石とローター磁石とが2次流路を横切って連携している前記磁気軸受、及び

ハウジング内に配置され、ローターを回転させこれによりポンプを通して血液を圧送するために1次流路を横切ってローターと連携するモーターを備えた血液ポンプ。

【請求項34】 各ローターブレードが、ポンプを通って流れている血液に加えられる剪断ストレスを減らす丸みの付けられた先端を有する請求項33の血液ポンプ。

【請求項35】 各ローターブレードが、流れの停滞する局所的領域を減らすように、各それぞれのローターブレードの第1の部分及び第2の部分をローターに連結するフィレットを備える請求項33の血液ポンプ。

【請求項36】 血液圧送用の血液ポンプであって、

(a) (a₁) 周囲に複数のステーターブレードが配置された第1の端部、

(a₂) 周囲に複数のステーターブレードが配置されかつ実質的に円錐状である第2の端部、

(a₃) 第1の端部と第2の端部とを連結する静止ハブ

を備えたステーター、

(b) (b₁) ステーターの第1の端部の近くに配置された実質的に円錐状の端部、

を備えたポンプ。

【請求項27】 2次流路を通り流れが1次流路を通り流れと逆行する請求項26のポンプ。

【請求項28】 2次流路が、ステーターの第2の端部とローターとの間に配置された入口、ステーターの第2の端部とローターとの間に定められた実質的に内向きの半径方向流路、ステーターの静止ハブとローターとの間に定められた実質的に軸方向の流路、及びステーターの静止ハブとローターとの間に定められた出口を備える請求項26のポンプ。

【請求項29】 ハウジング内でローターを軸方向で整列させるための磁気スラスト軸受を更に備える請求項26のポンプ。

【請求項30】 磁気スラスト軸受が能動的磁気軸受を備える請求項29のポンプ。

【請求項31】 能動的磁気スラスト軸受がハウジング内に配置された1対のスラストコイルを備え、その各が、ローターに軸方向の力を置くために、ローター内に配置された1対の極の一つと相互作用する請求項30のポンプ。

【請求項32】 能動的スラスト軸受が、ローターの軸方向位置を感知するためにステーター内に配置されたセンサー、及びポンプ内に配置され、ハウジング内でローターを軸方向で位置決めするためにスラストコイルを通って流れている電流を制御する電磁制御器を更に備える請求項31のポンプ。

【請求項33】 血液圧送用のポンプであって、

入口及び出口を定めているハウジング、

ハウジング内に配置されかつハウジングに結合されているステーターであって、入口に配置された第1の端部、出口に配置された第2の端部を有し、そして周囲に複数のステーターブレードが配置され、更に第1の端部を第2の端部に連結する静止ハブを有する前記ステーター、

ハウジング内に配置され、ステーターの静止ハブの周囲に懸架されたローターであって、1次血液流路がローターとハウジングとの間に定められかつ2次血液流路がローターとステーターとの間に定められ、更にステーターの第1の端部の近くに配置された実質的に円錐状の端部と実質的に円錐状の端部の上流に配置さ

(b₂) 実質的に円錐状の端部に連結された実質的に円筒状の部分、

(b₃) 実質的に円錐状の端部から実質的に円筒状の部分に伸びている複数のインペラーブレード

を備え、ステーターの周囲に磁気的に懸架されたローター、

(c) ステーターの静止ハブ内に配置された磁石とローターの実質的に円筒状に部分内に配置された磁石とにより定められ、ローターをステーターから半径方向で懸架する磁気軸受、及び

(d) 内部にステーターが配置され更に内部にローターが懸架されて配置されたハウジングであって、ローターとハウジングとの間を流れれる血液のための滑らかな通路を定めるようにステーターの第1の端部からステーターの第2の端部に伸びかつローターの実質的に円錐状の端部とローターの実質的に円筒状の部分の形状と一致し、これによりポンプを通って流れている血液の剪断ストレスを減らし、更に流れの停滞及び逆流を防ぐようにステーターの第2の端部とハウジングとの間を流れるように血液のための比較的滑らかな通路を提供するためにステーターの第2の端部と一致する内面を有するハウジングを備えた血液ポンプ。

【請求項37】 血液圧送用のポンプであって、

入口及び出口を定めているハウジング、

ハウジング内に配置されかつハウジングに結合されているステーターであって、

(i) 入口に配置され、周囲に複数のステーターブレードが配置され、更に第1の直径を有する第1の端部、

(ii) 出口に配置され、実質的に円錐状でありかつ周囲に配置された複数のステーターブレードを有する第2の端部であって、実質的に円錐状でありかつステーターの第1の端部の第1の直径より大きい第2の直径を有する第2の端部、

(iii) 第1の端部を第2の端部に連結し更に第2の直径より小さい第3の直径を有する静止ハブ

を備えたステーター、

ステーターの静止ハブの周囲に懸架され、かつハブとステーターとの間に配置

されたローターであって、

(i) ステーターの第1の端部からローターに流れる血液の滑らかな通路を提供するために、ステーターの第1の端部の近くに配置された実質的に円錐状の端部、

(ii) 実質的に円錐状の端部の上流に配置されかつステーターの静止ハブの周りに懸架された円筒状部分であって、ローターの円筒状部分からステーターの第2の端部に流れる血液の滑らかな通路を提供するように、円筒状部分の外径が第2の端部の第2の外径にはば等しい円筒状部分、

を備えたローター、

ステーター内に配置されたステーター磁石とローター内に配置されたローター磁石とにより定められた磁気軸受であって、ローターをステーターの静止ハブとハウジングとの間に磁的に懸架する磁気軸受、及び

ハウジング内に配置され、ローターを回転させこれによりポンプを通して血液を圧送するためにローターと連携するモーター
を備えたポンプ。

【0005】

右心室支援の構成、又は両心室支援の構成で患者の心臓に連結される。例えば、左心室支援構成が採用された場合は、回転ポンプは患者の心臓の左心室及び大動脈との間に連結される。一般に、回転ポンプは、入口と出口とを有するハウジング、ハウジング内に位置決めされたインペラー、及びインペラーから伸びているインペラーブレードを備える。血液はハウジングの入口に入り、そして回転インペラーによりハウジングを通り出口に圧送され更に患者の循環系に入る。

【0006】

血液ポンプは特別な種類の装置である。このことは、ポンプ内の圧送流体が必ずしも生体親和性でない場合、人工的に圧送されている血液中に存在してはいけない多くのものがあるため特にその通りである。血液を圧送するとき、血球の破損は、血小板の活性化、凝固及び潜在的に致命的な血栓症を導くことが有り得るので、これを防ぐことが絶対に必要である。例えば、温度上昇により凝固が生ずることが有り得るため、血液の温度は注意深く管理されねばならない。更に、血球は、血液温度が42°Cに達すると凝固し又は血液のアルブミンが変性する。もっと低い温度でも幾つかの悪影響が発生することがある。血液ポンプの効率が比較的よくない場合は、ポンプは、通常は熱の形で過剰なエネルギーを血液に与える。このため、血液への熱の移動を避けるように血液ポンプを効率的にすることが必須である。必然的に効果的な熱管理が非常に重要である。更に、急激な流れの阻止は過剰な剪断ストレスを発生させる可能性がある。

【0007】

更に、多くの研究は、剪断ストレスのような大きいストレスに血液を暴露することは血球の急速な又は遅延した破壊をもたらすことを証明した。インペラーの回転のために、血液の圧送運動中に、乱流、ジェットの形成、キャビテーション及び急激な加速が作られ、ポンプを通って流れている血球の破損と破裂とが生ずることがある。更に、血液ポンプ内のエッジ又は突起した面が血球の剪断ストレスと破壊とを生ずることが有り得る。また、ポンプの幾何学的形状が局所的な流れの遅い領域又は停滞領域を作る可能性がある。流れの停滞は、血液の成分をポンプ構造上に堆積、凝固させ、血栓症を導く可能性がある。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【政府の権利の説明】

本発明は、米国政府の使用者及びピッツバーグ大学の使用者との共同でなされ、そして、これは、米国政府又は米国政府の目的のために、これに対する特許権使用料の支払いなしに製造し又は使用することができる。

【0002】

【関連出願のクロスレファレンス】

本願は1996年6月26日付け米国出願08/673627号Magnetically Suspended Miniature Fluid Pump And Method of Making The Same (磁気懸架された超小型液体ポンプ及びその製造方法) の一部継続出願であり、そして1999年6月1日付け暫定出願60/142354号An Improved Blood Pump Having A Magnetically Suspended Rotor (磁気懸架されたローターを有する改良された血液ポンプ) についての米国特許法119条(e)による優先権を請求し、これによりこれら出願の出願日の恩典を請求し、かつこれらの全体を参考文献として組み入れる。

【0003】

【発明の分野】

本発明は、磁気懸架されたローターを有する改良された血液ポンプ及びその製造方法に関する。本発明は、ハウジング、ローター、ハウジングに取り付けられたステーター部材、ローターが実質的にハウジングの中心に置かれるようにローターを浮揚させる手段、及びローターを回転させる手段を有する血液ポンプも含む。本発明は、更に、血液に加わる剪断ストレスを最小にし、生体親和性を強化し、かつ血小板の活性化を防止して血栓症を防止する幾何学的形状を有する血液ポンプを含む。

【0004】

【発明の背景】

血液の圧送について患者の心臓を支援するための回転ポンプ式心室支援装置の使用はよく知られる。かかる回転ポンプ式心室支援装置は、左心室支援の構成、

心室支援装置として血液ポンプを使用するように制限されたデザインに適合するための多くの試みがなされた。ある一形式の通常の回転ポンプは機械式軸受を使用するが、これは軸受の潤滑と熱発生の最小化とのために、外部潤滑油容器で潤滑油を流し又はフラッキングすることが必要である。この形式の回転ポンプの例が、Cruikshank他の米国特許4944722号及びWampler他の米国特許4846152号に示される。この形式のポンプは多くの欠点がある。潤滑清浄用流体の経皮的供給は患者の生活の質を劣化させ、かつ悪影響及び感染の可能性を与える。外部潤滑のためのシールは摩耗及び流体の攻撃の影響を受けやすく、これが漏洩を起こすことがある。これはポンプを停止させることがある。また、軸受の潤滑剤を送るために追加のポンプが必要である。この形式の回転ポンプのなお別の欠点は、軸受が別のポンプ構造と直接接觸しているため、時間が経つと摩耗により交換を要することである。

【0008】

潤滑剤の外部清掃の必要を無くすために、磁気的に懸架されたインペラーを有する回転ポンプが作られた。磁気懸架式インペラーの使用により、軸受及びその他のポンプ構造との直接接觸、並びに外部潤滑剤の清掃が無くされた。この形式の回転ポンプの例が、Bramm他の米国特許5326344号及びOlisen他の米国特許4688998号に明からにされる。この形式の回転ポンプは、一般に、ハウジング内に位置決めされたインペラーを有し、このインペラーは、インペラー及びハウジングに置かれた永久磁石及びハウジング内に位置決めされた電磁石の組合せにより、ハウジング内で支持されかつ安定にされる。インペラーは、ハウジング内に取り付けられた強磁性体ステーター及び直徑方向で反対方向の2個の突起の周りで曲げられた電磁コイルにより回転させられる。強磁性インペラー及び電磁コイルは、回転ポンプの回転軸線に関して対称的位置決めされ、従ってハウジングとインペラーとの間に形成された1個の環状の間隙を通過する流体に軸方向の対称的な力を加える。

【0009】

この形式の回転ポンプの欠点は、血液が通過するための環状の間隙が1個しかなことである。この間隙は、流体の流れ及びインペラーの磁気懸架と回転に関する

る両立しない目標を持つ。液体の流れに関しては、同様は効果的な圧送のために大きい方が望ましく、一方、インペラーの効果的な懸架と回転のためには、この同様は小さい方が望ましい。この形式の回転ポンプにおいては、適正な磁気懸架を提供するために、流体間隙は比較的小さくしなければならない。これは、同様を比較的小さくしなければならないため、血液の効果的な圧送は許さない。

【0010】

血液ポンプは、磁気懸架とは対照的に水力学的懸架を有して設計されてきた。この形式の懸架の両側の差圧のため、この形式の懸架水流は一般に最小である。そこで、この形式のポンプは、一般に、懸架内に血液の比較的停滞した領域を持つ。このため、この形式のポンプの欠点は、懸架の周りの領域で血液が比較的停滞し、これが血液要素の堆積、凝固、及び血栓症の可能性を導くことである。

【0011】

血液ポンプの生体親和性の確保と別の関心事は、血液ポンプの大きさを最小にすることである。血液ポンプの大きさを最小にすることにより、血液が接触しなければならない異物の表面積の大きさが減少する。これは、血液が汚染され又は血球が破壊されるであろうことの可能性を減らす。血液ポンプの大きさを最小にすることに関して対立することがある。血液ポンプの大きさを小さくすると、流路が狭くなり、所要の回転速度が高くなり、そして剪断ストレス増加の可能性が大きくなる。このため、過剰な剪断ストレスを防ぐように小型血液ポンプを設計することが重要である。

【0012】

本発明の血液ポンプは、血液の圧送における改善を提供する。これらの特徴は、特に、ローターの磁気懸架に関連し、ポンプ寸法の最小化と同時にポンプのある種の形態的特徴によりポンプの生体親和性と信頼性とを強化する。

【0013】

【発明の概要】

本発明の血液ポンプは、ハウジング、ステーター又は静止部材、及びステーターとハウジングとの間に磁気的に懸架されたローターを持つ。1次流路がハウジングとローターとの間に定められ、2次流路がステーターとローターとの間に定

一で発生した熱は血液からより容易に放散させることができる。これがポンプの生体親和性を強化する。更に、ハウジング内にモーターステーターを置くことにより、モーターステーターに関するハウジング内の増加した体積のため、より大きい電線を使うことができる。より大きい電線はモーターステーターの抵抗熱を減少させるため、これは重要である。

【0016】

上述のように、ローターは、2次流路を横切る磁気の相互作用のため、磁気的に懸架される。2次流路は、二つの対抗した考え方を平衡させる大きさのものである。2次流路は、2次流路全体を適切に血液が流れこれにより2次流路の局所的領域に沿った血液の停滞と集合を防止するに十分に大きくなればならない。血液の停滞と集合とは血栓症を、終局的には血栓症を誘発する可能性がある。他方、2次流路は、ポンプの大きさ及び血液と接触する異物の表面積を最小化するためにラジアル磁気懸架が効果的に働くように、十分に小さくなればならない。そこで、2次流路は、これら対抗する考え方を平衡させるように最適な大きさにされる。

【0017】

好ましい実施例においては、2次流路を通過する流れは、1次流路を通過する流れの方向とは反対の逆向きとすることが可能。2次流路の強化されたフラッシングは逆流により達成することができる。流れが1次流路と同じ方向である場合は、2次流路及びポンプを更に大きくすることなしでは、流量が希望量のフラッシングの提供に不十分であることが見いだされている。

【0018】

好ましくは、ステーター、ローター、及びハウジングは、全てが流線形に、又は血液のための比較的滑らかな流路を作り、更に比較的鋭い面又はエッジと血液との接触を防ぐような形状にされる。上述のように、かかる面は、血液のストレスを大きくし更に血球がかかる面と接触し凝固する可能性を大きくするので望ましくない。

【0019】

本発明のその他の特徴は以下提供される。

められる。1次流路は、ポンプを通って流れる血液の実質的に殆ど全部のための流路である。ポンプ内でローターを半径方向に懸架するラジアル磁気懸架がポンプ内に定められる。好ましくは、ラジアル懸架は、ローター内に配置された磁石積層体及びステーター内に配置されかつローター内の磁石積層体と整列された磁石積層体を持つ。これら2個の磁石積層体は2次流路を跨いで相互作用をし、ローターをステーターから半径方向で懸架する。ラジアル懸架が跨いで作動する2次流路を提供することにより、1次流路を、適切な流量又は体積の圧送血液を提供するに十分に大きくすることができる。

【0014】

ポンプは、ローターの軸方向位置を制御するためにスラスト懸架も持つ。好ましい実施例においては、スラスト懸架は、ラジアル懸架、ハウジング内に配置されたスラストコイル、ローター内に配置された磁石片、センサー、及び制御器を持つ。ラジアル懸架は、軸方向の力をもつ。好ましくはハウジング内に位置されたスラストコイルは、好ましくはローター内に配置された磁石片と協調して軸方向の逆作用の力を作用する。ポンプを通って流れる血液も、ローターに軸方向の力を加える。ローターの軸方向位置を維持するために、ポンプは上に説明された制御器とセンサーとを有することが好ましい。センサーは、ローターの軸方向位置を決めるためにステーター内に配置されかつローターと連携する感知用コイルを有することが好ましい。制御器は、センサー及びスラストコイルと電気的に連携する。制御器は、感知用コイルにより感知された位置に基づいて、スラストコイルを通る電流を調整する。これは、ローターに加わる軸方向の力を調整し、ローターをポンプ内のこの好ましい軸方向位置に位置決めする。好ましい実施例においては、制御器は、仮想ゼロ出力 (Virtually Zero Power) 制御器である。

【0015】

モーター駆動用のモーターステーターは、好ましくはハウジング内に配置され、そしてローターを回転させるために1次流路を横切ってローター磁石と連携 (communicate) する。周りをローターが回転するステーター又は静止部材とは反対に、モーターステーターをハウジング内に置くことにより、モータ

【0020】

図1から5は、ハウジング12、インペラーブレード16のあるインペラーハウジング14、ステーター部材18、ハウジング12内でインペラーハウジング14を中央位置に浮揚させる手段、及びインペラーハウジング14を回転させる手段を有する軸方向回転ポンプを実質的に備えた本発明の好ましい実施例を示す。ハウジングは、好ましくは円筒状であって、内面20、内面20と同心でかつこれから間隔を空けられた外面22、入口24、及び出口26を持つ。内面は内部領域28を定め、この中にインペラーハウジング14が置かれる。インペラーハウジング14 (図2) は、図2に示されるように、実質的に軸方向対称の長いボデー30、円錐状のノーズ32、及び円錐状のテール34を持つ。インペラーハウジング14のノーズ32上及びインペラーハウジング14のテール34上にそれぞれ磁気ターゲット36及び38が位置決めされる。インペラーブレード16は、実質的に螺旋状の軟質磁性材料であり、図3に最もよく示されるようにインペラーハウジング14のボデー30上に永久磁石13に取り付けられる。

【0021】

ステーター部材18は、図1に示されるように、上流側の静止ブレード40の組、下流側の静止ブレード42の組、モーターステーター44、及び角度センサー46を持つ。上流側の静止ブレード40の組及び下流側の静止ブレード42の組はハウジング12に取り付けられ、そしてハウジング12の長手方向軸線48に向かって収束する。上流側の静止ブレード40の組の自由端及び下流側の静止ブレード42の組の自由端部は、それぞれ、上流通路50及び下流通路52を定める。インペラーノーズ32及びインペラーテール34は、上流側及び下流側の静止ブレード40及び42の組とインペラーノーズ32及びインペラーテール34の間に間隙54及び56が形成されるように、それぞれ上流通路50及び下流通路52内で伸びる。図4に最もよく見られるように、下流側静止ブレード42の組は、ハウジング12の図1に見られるような内部領域28内に、流体の流れの領域を更に定める。図示されないが、上流側の静止ブレード40の組によっても同様な流体の流れ領域が定められる。図4は下流側の静止ブレード42の組を通して得られた断面図であるが、上流が静止ブレード40の組を通して得られる断面が実質的に同じであろうことが認識されるであろう。上流側の静止ブレード

組40及び42は軟質磁気材料で作ることができるが、これらは直列に置かれた永久磁石より作ることができる。上流側及び下流側の静止ブレード40、42の組の各は、4個の静止ブレードを備えるとして図示されたが、その他の組合せのブレードを使うことができる。

【0022】

インペラーハウジングを回転させる手段は、ブラシなし直流モーターであって、モーターステーター44、角度センサー46、永久磁石13を有するインペラーハウジング30、軟質磁気材料製の磁束焦点用構造15、及びモーターの磁極として作用しあつ生体親和性材料で被覆された軟質磁性材料より作られたインペラーブレード16を有する前記モーターである。モーターステーター44及び角度センサー46は、内面20と外面22との間でハウジング12内に位置決めされる。モーターステーターコイル66は、図3に示されるように、モーターステーター44の上に巻かれる。モーターステーターコイルを通る電流は、インペラーハウジングの回転のために好ましいが、その他の種々の回転手段を本発明において使用することができる。或いは、ブラシなし直流モーターは2極モーターの形式を取ることができる。

【0023】

インペラーハウジング12を浮揚させる手段(図4)は、背鉄(back iron)セグメント62の周りに巻かれた独立制御のコイル60、及び磁極片として作用する4個の静止ブレード42を有する円錐状軸受であり、このセグメントは、軟質磁気材料で作られ、分割され、そして半径方向に磁化された永久磁石64である。コイル60は、インペラーハウジング12の中心にくるように制御される。この設計は、流体の流れが4個の流体の流れ領域58を通過することを要求される場合の使用に特に適している。本発明の手段は能動的ラジアル軸受を描写する。

【0024】

円錐状軸受は、これがフィードバックシステム及び増幅器により制御されたときに半径方向の剛性及び軸方向の剛性を提供する。背鉄セグメント62の周りに

ヤンセル制御器に使用され種々の形式の制御装置として公知である。制御アルゴリズムのある例は、比例一積分一導関数及びゼローパワー制御アルゴリズムである。磁気軸受センサー及びインペラーハウジング12は、軸受磁束がコイル電流にいかに反応するか、及びインペラーハウジング12が軸受磁束により作られた磁力にいかに応答するかをモデル化する。

【0027】

回転ポンプ10の回転中、血液は、矢印Aの方向でハウジング12の入口24に入る。血液は、図4に示された間隙54及び流体領域58を経てインペラーノーズ32上を通過する。上流側の静止ブレード40の組は、到來する血液を整流するように作用する。インペラーハウジング12を通過して出口26に向かって動くように、インペラーブレード16が血液を加速しエネルギーを与える。下流側の静止ブレード42の組は、インペラーブレード16から出でてくる血液の流れから圧力エネルギーの形で速度エネルギーを回収するように機能する。血液は、ハウジング12から出る前に、間隙56及び下流側の静止ブレード42の組により形成された流体の流れの領域58を通過する。間隙54及び56は、停滞領域及び過剰な剪断の形成を防ぐに十分に大きいと同時にインペラーハウジング12の効果的な磁気懸架を提供するに十分に小さいような寸法にされかつ釣り合いを取られる。更に、インペラーハウジング12の軸方向対称の形態が、血液の停滞又は過剰な剪断を作ることなくハウジング12を通過する流れを提供する。

【0028】

上述のように、インペラーノーズ32及びインペラーテール34は、電磁コイル60により作られかつ上流側及び下流側の静止ブレード40及び42の組を通して指向された磁束により、ハウジング12内で懸架されかつ中心を合わせられる。間隙54及び56は、磁気回路のリラクタンスを実質的に増加させることなく間隙を横切って磁束を向けることができるよう十分に小さい。血液の圧送中に、インペラーハウジング12内のその中心位置から動くと、位置センサー65がこの運動を検出し、インペラーハウジング12内のその中心位置に置き直すようにインペラーハウジング12内に正味の力とモ

巻かれた電磁コイル60は、磁束を電磁コイル60から指向させて、インペラーテール34が懸架されて実質的に下流通路52の中心にくるようになる。更に、永久のバイアスを提供して所要の定常電流を減らすために永久磁石64が背鉄セグメント62内に提供される。電磁コイル60を下流側の静止ブレード42の組の周りでなく背鉄セグメントの周りに巻くことにより、流体の流れの領域58は、停滞又は乱流の領域を形成することなく、血液の通過に十分に大きいままである。

【0025】

ハウジング12の入口24と出口24でかつインペラーノーズ32とインペラーテール34に隣接して位置センサー65が取り付けられる。ホール効果、渦電流、又は赤外線式光センサーを含むいかなる位置センサーも使うことができる。インペラーハウジング12の位置は、コイル60のインダクタンスの変化から感知することができる。かかる感知計画により制御される磁気軸受は、D.Vischer他の"Analysis of Self-Sensing Active Magnetic Bearing Working On Induction Measurement Principle," Second International Conference on Magnetic Bearings, Tokyo, pp.301-309, 6-1990において説明されたような軸受に関して使用されたときのセンサーなし軸受として引用される。

【0026】

インペラーハウジング12を磁気的に浮揚させるために、図5に示されたようなフィードバック制御器が使用される。位置誤差が8個の位置センサー65により測定され、誤差信号 x_1, z_1, x_0, z_0 及び y に転換される。このとき、 x_1 及び z_1 の大きさは入口24において測定されたインペラーハウジング12のインペラーハウジング12の変位 x 及び z に相当し、 x_0 及び z_0 は出口26において測定された値に相当する。誤差の転換は図5に示されたセンサーデカブラー70により達成され、これはセンサー65の位置及び方向の単純なマトリックス乗算である。5個の主変位誤差が5チャンネル制御器72により独立して測定され、インペラーハウジング12に加えるべき5個の希望の復原力を出力する。軸受デカブラー74が、これらの指令をマトリックス乗算を介して、コイル60に印加すべき適切なコイル電流パターンに変換する。電流指令はコイル60を駆動する増幅器76に入力される。デカブリングの原理は、5チ

ーメントを加える。例えば、 y 方向の正味の力は、適切な対応コイル電流により、出口間隙56における磁束を大きくしかつ入口間隙54における磁束を減らすことにより達成される。電流の計算は、組み合って作動する5チャンネル制御器72のセンサーデカブラー、及び軸受デカブラー74により達成される。或いは、インペラーハウジング12の運動の感知は、コイルの電圧と電流からコイルのインダクタンスを評価し、次いでコイルのインダクタンスから間隙を算出することにより達成される。

【0029】

電気モーター及び磁気軸受の両者を含む磁気構成要素の変動は、よく行われかづよく文書化されている。以下は、幾種かの典型的な磁気構成要素及びこれら磁気構成要素をいかに好ましい本発明の実施例に使用できるかを説明する。

【0030】

【受動的ラジアル軸受(PRB)】

図6は、永久磁石軸受である受動的ラジアル軸受(PRB)の通常の設計を示す。これは、交互に磁化された環状永久磁石100a、100b、100c、100d、102a、102b、102c及び102dより構成され、かつそれぞれ受動的ラジアル軸受の2個の環状磁気リング110及び112を備える。環状リング112又は110のいずれも、回転ポンプのインペラーハウジング12の実施例における永久磁石の数は同じであるが、これは4個である必要はない。別の数の磁石を使いことができる。

【0031】

環状磁石リング110及び112は、半径方向の剛性を提供するように磁化される。しかし、軸方向の剛性が半径方向剛性の2倍と等しい大きさの負であることがこの形式の軸受の特性である。この負の剛性は、軸方向位置決めには単独で使用できないが、図7に示されたような軸方向バイアス力を提供するためにこれを使用することができる。環状磁石リング110と112とを相互に軸方向で動かすことにより、矢印で示されたように正味の安定状態の力120及び122を軸方向に加えることができる。これは、磁石102aが磁石100aの力を方向

120で加え更に磁石102bが磁石100aの力を方向120で加えるためである。同様な相互作用が別の磁石間で生ずる。受動的ラジアル軸受は、更に、J. P. Yonnet他の"Stacked Structures of Passive Magnetic Bearings", Journal of Applied Physics, vol. 70, no. 10, pp. 6633-6635において説明され、これは参考文献としても組み込まれる。

【0032】

別形式のPRBが図8に示される。この軸受は、ステーター磁石130と134及び軟質磁性ステーター磁極片132、136、138、140を有するステーター130aを持つ。軸受インペラ148は、歯144を有する軟質磁性材料である。永久磁石130及び134は、磁束が磁極片132、136、138及び140を通りそして矢印149で示されたように閉鎖ループ内で軸受インペラ148を通過するように軸方向に磁化される。インペラの歯144及びステーターの歯142は、この軸受の半径方向位置に生ずる磁気回路のリラクタンスを最小にするように揃うような傾向がある。この受動的ラジアル軸受は、図6の軸受のように軸方向では不安定である。歯142により定められた凹所146は、血液の停滞域を無くすように非磁性材料で満たされる。図8において番号148で示された構造は回転してインペラとして作動し、更に番号130aで示された構造はステーターとして作動するが、番号148で示された構造は、これがステーターとして作動するようにこれを固定し得ることが認められるであろう。同様に、番号130aで示された構造は、自由に回転できかつインペラとして作動するようにインペラーブレードを持つことができる。

【0033】

図9は、受動的ラジアル半軸受(PRB2)を示す。この軸受は、インペラ148に半径方向位置決めを提供する図8のものと同様であるが、図8のPRBとは異なり、インペラ148に方向150のバイアス力を提供する。

【0034】

【能動的ラジアル軸受(ARB)】

図10a及び10bは、能動的ラジアル軸受(ARB)を示す。この軸受は、軟質磁性材料セグメント151、分割され半径方向に磁化された永久磁石153

に電流を加えると、インペラ175に方向176の力が加えられ、これによりステーターの磁極片166がインペラの歯174と揃えられる。同様に、励磁されたコイル172は、インペラ175に方向178の力を加える。インペラ175の軸方向位置を感知することにより、フィードバック制御器がインペラ175を軸方向で位置決めすることができる。これらの軸受は、中等程度の負の半径方向剛性を示し、従って能動的な制御を必要とする。図15は、インペラ182に方向180の力を与えるだけの能動的スラスト半軸受(ATB2)を示す。

【0040】

図16は、別の能動的スラスト半軸受を示す。ステーターは、バイアス用永久磁石188により方向190により駆動される軟鉄又は強磁性体片184と186とよりなる。バイアス用磁束は、軟質磁石ターゲット194に加えられる力が制御されるように、制御コイル192により変調される。これは、力が方向198においてのみインペラに加えられるのでATB2である。図17は、図16と同じ原理に基づく2個のATB2よりなるATBを示す。

【0041】

図17A-17Cは、本発明のポンプとともに使用し得る別の形式の能動的スラスト軸受を示す。これらの図には、ローレンツ力アクチュエーターを含む能動的スラスト軸受が示される。図17Aに示されるように、ローレンツ力アクチュエーターは、好ましくは銅で作られ電流が流れるコイル199aを持つ。このコイルにより作られた磁場が、ローターの軸方向の位置決めをするようにローター内に配置された磁石199d及び磁極片199cと相互作用する。2個のコイル199a内の電流は等しくてかつ方向が反対であることが好ましい。

【0042】

図17Bは別形式のローレンツ力アクチュエーターを示し、これにおいては、銅コイル199aが1個の磁石199bと相互作用してローターの軸方向位置を制御する、図17Cは、第3の形式のローレンツ力アクチュエーターを示し、これは、外側鉄部材199d、銅コイル199a、及び1個の磁石199bを含む。

、独立制御されるコイル155、及び4個の磁極片157より構成される。ローター159は軟質磁性材料である。永久磁石は、これらが、ローターとステーターとの間の4個の隙間161におけるバイアス磁束を提供するように磁化される。このバイアスの方向は、4個の矢印163により示される。ステーターコイルは、ステーターの周りでローターの中心を合せるように制御される。この設計は、流体の流れが4個の軸受通路165を通ることが要求される用途に特に適している。

【0035】

この軸受は、これがフィードバックシステム及び増幅器により制御されたとき、半径方向の剛性を提供しつつ軸方向の剛性は本質的に小さい。

【0036】

受動的スラスト軸受(PTB)及び受動的スラスト半軸受(PTB2)

図11は、受動的スラスト軸受を示す。軸受ローター152は、ステーター162上の磁石スタック158及び160に反発する2個の磁石スタック154及び156を支持する。磁気相互作用の正の効果は、軸受が正の軸方向剛性と負の半径方向剛性を有することである。

【0037】

同様な軸受が図12に示され、これは、ローター164aに方向164のスラストを加えるだけである。かかる軸受は受動的スラスト半軸受(PTB2)と呼ばれる。全ての軸受間隙を、停滞及び剝離した流れのない血液の流れを提供するような外形にことができる。

【0038】

図13は、図8のラジアル軸受と同じ原理を使用するが、図8の軸方向間隙が図13の半径方向間隙のように置き直されることで図8と明かに異なるスラスト軸受を示す。

【0039】

能動的スラスト軸受(ATB)及び能動的スラスト半軸受(ATB2)

図14は、能動的スラスト軸受を示す。ステーターは、磁極片166と168及び独立して駆動されるコイル170と172より構成される。コイル170

【0043】

【ハイブリッド構成要素】

2個の磁気構成要素の機能を物理的に一体化できることが多い、例えば、図18は、ローター204及びステーター206に加えてそれぞれ歯200及び202を有する図10a及び10bのARBを示す。軸受の隙間208を横切る磁場が、フィードバック制御なしに歯200及び202を能動的に整列させる。従って、これはPTBとARBとのハイブリッドであり、これはPTB=ARBのように示される。

【0044】

同様なハイブリッドが図19に示される。コイル210が、図9のPRBの半分であるPRBに加えられる。このコイルは、スラストをローター軸線に沿って一方向で能動的に制御する。ATB2の機能がPRBに加えられたため、得られたハイブリッドはATB2=PRBのように示される。

【0045】

図1の入口側の円錐状軸受は、磁極の面の角度がスラスト軸受とラジアル軸受との中间であるため、能動的ラジアル軸受とスラスト半軸受とのハイブリッドである。円錐状軸受の磁極は、ポンプのステーターブレードとしても作動する。

【0046】

流体構成要素と磁気構成要素とのハイブリッド化もまた可能である、ポンプブレード、インペラーブレードとステーターブレードの両者は、磁束通路として使用することができる。図1のステーターブレードは、円錐状磁気軸受用の磁極片として作用する。更に、インペラーブレードは、図1のブラシなしモーター用の磁束経路である、ステーターブレードについては受動的磁気軸受ステーターの支持具として、またインペラーブレードについては磁石構造を支持するために作動することができる。

【0047】

図20ないし23は、同様にスラストに対しても制御することができるパンケーキ型誘導モーターを示す。図20及び21は、パンケーキ型誘導モーター用のステーター磁極212及びステーターコイル214を有するステーターを示す。

図22及び23は、磁鉄部材216及びスロット導体218のある電機子222を示す。環状領域220及び223もまた導電体である。6個のステーターコイル電流を制御することにより、パンケーキ型モーターのモータートルクとストラスト力を同時に変えることができる。これは、ステーター磁場の回転用周波数及びステーター磁場の増幅度を無関係に変えることにより行うことができる。可変リラクタンス型モーターの同様なハイブリッド化が、米国特許4683391号に説明される。

【0048】

回転手段として使用されるモーターの別の実施例は、図24に示された2極型ブラシなし直流モーター224aである。ローター224bは、ステーターとともに示される。図24にはステーターコイルは示されず、これは図3のものと同様である。

【0049】

【代わりの回転手段】

図1のモーター構成の代わりが図25に示される。これは、可変リラクタンス型モーターであり、ローター磁極とインペラーブレードとがハイブリッド化される。ローター224は、ブレード226と同様な軟質磁性材料で作られる。このモーターの整流は直流ブラシなしモーターのものとは異なるが、モーター制御技術の熟練者によく知られる。

【0050】

図26は、図1に示された回転ポンプに使用されるなお別の可能なモーター構成である。このものは誘導モーターであり、そのインペラースロット構造がインペラーブレード228とハイブリッド化される。ステーターコイル230を介してインペラに回転磁界を適用することにより、電流がスロット導体232内に誘導される。この導体は隣接のスロット導体と接続している電流戻り経路を持ち、これは図示されないが、インペラーの軸方向端部キャップ上にある。

【0051】

図27は、本発明の回転ポンプに使用される可変リラクタンスモーターの断面を示す。このモーター236のインペラーは、軟質磁性材料（例えば、約3%シ

【0055】

\times 磁気隙がハブに隣接して位置決めされる場合の磁気構成要素Xを示すために使用される。

【0056】

$-$ 2個の構成要素が血液流路に沿って連続することを示す線分である。

【0057】

$=$ 2個の構成要素が機能的に一体化され又はハイブリッド化されたことを示す。

【0058】

x
 l
 i_b 構成要素Xがインペラーブレードとハイブリッド化されたことを示すために使用される。

【0059】

x
 l
 s_b 構成要素Xがステーターブレードとハイブリッド化されたことを示すために使用される。

【0060】

x
 l
 y 構成要素X及びYが構造支持具のために整列されたことを示す。

【0061】

(RH, AO) 設計形式を示す。この例は、「軸方向出口を有する回転ハブ」を示す。

これらの記号により、図1のポンプは次のように表すことができる。

【0062】

リコーン鉄）より作られる。

【0052】

図28は誘導モーターである。モーターの断面図はスロットコンダクター238及び軟質磁性材料のインペラ-240を示す。スロットコンダクター端部の電流戻り経路は示されない。

【0053】

本発明の回転手段及び浮揚手段のための種々の構成を記述するために以下の頭字語を使うことができる。

【0054】

ポンプ形式の記述

F H	固定ハブ
R H	回転ハブ
A O	軸方向出口
R O	半径方向出口
S p	固定ハブ支持具
s b	ステーターブレード
i b	インペラーブレード

磁気構成要素

A R B	能動性ラジアル軸受
A T B	能動性スラスト軸受
A T B 2	能動性スラスト半軸受
P R B	受動性ラジアル軸受
P R B 2	受動性スラスト半軸受
V R M	可変リラクタンスモーター
D C B M	直流ブラシなしモーター
I M	誘導モーター

その他の記号

\times	磁気隙がハウジングに隣接して位置決めされる場合の磁気構成要素Xを示すために使用される。
----------	---

【化1】

(RH, AO) $\overline{ATB2-ARB-DCBM-ARB-ATB2}$ (1)
 $\overline{|}$ $\overline{|}$ $\overline{|}$
 $\overline{sb -}$ $\overline{ib -}$ \overline{sb}

【0063】

各式は、ハブ形式（R H又はF H）及び出口形式（A O又はR O）を定める「見出し」、続くハウジング又はハブにおける磁気構成要素の順序と種類、隙間位置、及びこれらがハイブリッド化されているか否かを記述する「上部センテンス」より構成される。ハブ支持具の位置も上部センテンスにおいて示される。また、「下部センテンス」もあり、これは、上部センテンスと下部センテンスとの間で垂直方向で描いた流体構成要素の順序を記述し、下部センテンスは、整列を示すために|が、又は両センテンスの構成要素がハイブリッド化されることを示すために||が使用される場合を除いて、いかなる物理的整列も意味しない。

【0064】

式(1)は、軸方向出口（A O）を有する回転ハブ形式（R H）の設計を記述する。血液流路に沿った入口から出口までの構成要素は、円錐状軸受を形成する能動的ラジアル半軸受とハイブリッド化されたステーターブレードであり、ハイブリッド化された軸受は、1次流体流路の内径に向かう磁気隙を持つ。更に式(1)を読み取ると、ブラシなし直流モーターはインペラーブレードとハイブリッド化され、かつ流体流路の外径に向かうその磁気隙を持つ。更に式(1)を読みば、能動的ラジアル軸受は能動的スラスト半軸受とハイブリッドにされ、この軸受は更に1組のステーターブレードとハイブリッド化される。

【0065】

この言語を使用して、本発明の回転ポンプの多くの実施例が列挙される。物理的制限を適用することにより、非実際的な設計は除かれる。

【0066】

式の見出しが、(F H, A O), (F H, R O), (R H, A O)又は(R H, R O)のいずれか一つである。式の上部センテンスは、磁気構成要素の頭字語

及び/又は-又は=で分離された支持具の頭字語の連鎖である。磁気構成要素の頭字語はアンダーラインを付けられるか又は付けられないのいずれかである。下部センテンスは、インペラーブレードの頭字語か又はステーターブレードの頭字語のいずれか連鎖である。下部センテンスの各頭字語は、順序の保存された上部センテンスの1個の頭字語と揃えられる。即ち、磁気構成要素を識別する頭字語(A)及び流体構成要素を識別する頭字語(B)が|で整列され、又は|でハイブリッド化され、更に、磁気構成要素を示す頭字語(C)と流体構成要素を示す頭字語(D)とが整列され、更に上部センテンスにおいてCがAに続くならば、下部センテンスにおいてDはCに続くはずである。これを「順序保存」特性と呼ぶ。

【0067】

幾つかの式は、以下の単純に構造的に合理的でないため除去することができる。見出し(RH, RO)を有する全ての式は、この構成における停滯領域の存在のため除去される。支持具は固定ハブ(FH)型のポンプについてのみ必要であるため、軸受がRHであるならばSpは出現しない。2個の磁気構成要素は固定ハブ支持具(Sp)により分離される。これが生じた場合は、インペラは2個の分離した部分に分割されるであろう。下部センテンスは、少なくも1個のインペラーブレード(ib)を含まねばならない。もし、見出しが固定ハブ(FH)を含むならば、上部センテンスは少なくも1個の支持具(Sp)を含まなければならない。上部センテンスは1個のモーターを含まねばならないが、信頼性の向上のため、追加モーターを持つことができる。磁気構成要素は、インペラのx, t, z, ピッチ(θ)、及びヨー(ϕ)運動について力/モーメントの平衡を満たさなければならない。即ち、PRBのオフセット又はATB2と組み合ったいかなるバイアス力も平衡させねばならない。

【0068】

磁気軸受構成要素は、能動的及び受動的の両者とも、モーターがロール方向を制御するので、残余空間、y, z, ピッチ及びヨー方向における正の剛性(即ち、浮揚に対する正の復原力)を提供しなければならない。これは、5個の変位、対応復原力及びモーメントについての残余空間、y, z, ピッチ、及びヨーに

遇する正値の対称剛性マトリックスKにより数学的に特徴付けられる。図1に示されるように整列した軸線を持つローターの重心にある座標軸を考える。ピッチはx軸まわりの回転であり、ヨーはz軸まわりの回転であり、そしてロールはy軸まわりの回転であってモーターにより制御される。 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta, \Delta \phi)^T$ を、希望浮揚位置に関するインペラのx, y, z, ピッチ及びヨーの変位のベクトルとする。ただし、上添字Tは転置を示す。更に、与えられたフレームにおいて測定された対応の力及びモーメントのベクトルを $(f_x, f_y, f_z, m_x, m_y)^T$ とし、Kを $(f_x, f_y, f_z, m_x, m_y)^T = -K(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \theta, \Delta \phi)^T$ を満たすローターの「支持具剛性のマトリックス」とする。能動的軸受の適切なフィードバック制御の使用により、ローターの軸方向位置を維持することができる。これは、正値対称支持剛性マトリックスを有する特定の候補磁気軸受構成の使用により達成される。(正値は、全てのベクトルについて変数 $v \neq 0, v^T K v > 0$ であることを意味する)。フィードバック制御により、この剛性の特性を、ある周波数帯域にわたってのみ達成することができる。

【0069】

磁気軸受のある特定の組及び設置について支持剛性マトリックスが達成可能であるならば、この磁気軸受は「互換性あり」という。この互換性の定義により、支持剛性マトリックスの正値のコンピューター確認により多くの良好な設計を列举することができる。

【0070】

上に概説された列挙方法を使用して、本発明の追加実施例を説明することができる。互換性のある実施例は、

【0071】

【化2】

(FH,AO) Sp-PRB-ATB2-PRB-DCBM-Sp (2)

 |
 sb

 |
 ib -

 |
 sb

(FH,AO) Sp-PRB-DCBM-ATB2=ARB-Sp (3)

 |
 sb

 |
 - ib -

 |
 sb

(FH, RO) PRB-DCBM-PRB-ATB2-Sp (4)

 |
 ib

【0072】

追加の良好な実施例は次式を持つ。

分離されたスラスト軸受を有するものは次の通りである。

【0073】

【化3】

(FH,AO) Sp-PRB-DCBM-PRB-ATB2-Sp (5)

 |
 sb

 |
 ib -

 |
 sb

(FH,AO) Sp-PRB-DCBM-ARB-ATB2-Sp (6)

 |
 sb -

 |
 ib -

 |
 sb

(FH,AO) Sp-ARB-DCBM-PRB-ATB2-Sp (7)

 |
 sb -

 |
 ib -

 |
 sb

(FH,AO) Sp-ARB-DCBM-ARB-ATB2-Sp (8)

 |
 sb -

 |
 ib -

 |
 sb

(FH,AO) Sp-PRB-DCBM-ARB-ATB2-Sp (9)

 |
 sb -

 |
 ib -

 |
 sb

(FH,AO) Sp-PRB-DCBM-ARB-PTB-Sp (10)

 |
 sb -

 |
 ib -

 |
 sb

(FH, RO) PRB-DCBM-PRB-ATB (11)

 |
 ib

【0074】

外部モーターを有するものは次の通りである。

【0075】

【化4】

(FH,AO) Sp-PRB-ARB-PTB-DCBM-Sp (12)

 |
 sb -

 |
 ib -

 |
 sb

(FH,AO) Sp-PRB-PRB-ATB2-DCBM-Sp (13)

 |
 sb -

 |
 ib -

 |
 sb

【0076】

インペラ及びステータ部材の幾何学的構成は、回転ポンプの水力学的性能

及び生体親和性について極めて重要である。特に、流路は、血球を損傷し又は凝固を促進する可能性のある大きな流体ストレスの領域を避けるように設計されねばならない。更に、血液ポンプにおける血液成分の堆積は、血栓症及び発作の原因となり得るので、堆積の生ずる恐れのある血液停滞の領域は避けるべきである。インペラ、ステーター部材、及びハウジングの幾何学的構成の設計には、停滞域の発生したときに血液が凝固し易くなること及び過剰なストレスが加えられたときの血球破裂の性向を考慮して、コンピューター計算による流体力学的方法が使用される。

【0077】

図29は、本発明の幾何学的構成の設計に使用されるコンピューター計算による流体力学的方法の流れ図を示す。この回転流体ポンプ設計方法は、以下の諸段階を含む。即ち、(a) 回転流体ポンプ部分の初期幾何学的構成を選択し、(b) 幾何学的構成を媒介変数の形に変換し、(c) 血流に対する流体力学モデルを選択し、(d) 最小化すべき目的関数を選び、(e) 最初の幾何学的構成についての目的関数の流れの解及び値を決定し、(f) 設計変数に関する目的関数に基づいて初期幾何学的構成についての設計研究の方向を決定し、(g) 研究方向の情報を使用して幾何学的設計の媒介変数を変えることにより変更された流体ポンプ部分の第2の幾何学構造を選択し、(h) 第2の幾何学的構造についての目的関数の流れの解及び値を決定し、(i) 第1の幾何学構造についての目的関数と第2の幾何学構造についての目的関数とを比較し、(j) 第2の幾何学構造についての目的関数が第1の幾何学構造についての目的関数より小さい場合は、第2の幾何学構造を初期幾何学構造として、第2の幾何学構造についての目的関数が第1の幾何学構造についての目的関数より大きくなるまでステップ(g)から(j)を実行し、そして全体的な設計基準を評価し、(k) 全体的設計基準が更なる設計改良の可能性を示した場合は、第2の幾何学構造を初期幾何学構造として、更なる設計改良が不可能であると考えられるまでステップ(f)から(k)を実行し、或いは、初期設計構造が最終設計構造を表すものとして採用される。最終設計構造は、停滞及びポンプを通過する致傷的な流れを最小にする回転ポンプの部分の形状を定める。この方法は、インペラーブレード、インペラーハブ、ス

ンプの間の相違点だけが説明されるであろう。回転ポンプ242は、実質的に、ハウジング244、ハウジング244内に置かれたインペラ246、ステーター部材248、流入管250と流出管252、インペラ246をハウジング244内で浮揚させる手段、及びインペラ246を回転させる手段246を備える。インペラ246は、ノーズ254、テール256、及びインペラ246のノーズ254に置かれた誘導ブレード258を持つ。誘導ブレード258は、インペラーノーズ254の表面の周りを伸びる。誘導ブレード258、並びにインペラーブレード260は、形状が螺旋状であることが好ましい。誘導ブレード258は、ハウジングを通過する血液の流れを改良すると同時にキャビテーション感受性を減らすように機能する。流入管250はハウジング244の入口264に取り付けられ、そして流出管252はハウジング244の出口270に取り付けられる。流入管250は、第1の端部274と第2の端部276とを有する導管である。第1の端部274はハウジング入口264に取り付けられ、第2の端部276は心臓の左心室に取り付けることができる。第2の端部276は、砂時計形の外側形状を有するトランベット型の口の入口ノズル278を持つ。好ましくは、ノズル278の内径は、2.0mmから最終導管直径の1.2mmに先細にされる。流入管250と流出管252とは回転ポンプ242のハウジング244と一緒にされて示されるが、回転ポンプを患者に迅速に着脱できるような迅速連結機構(図示せず)を使った管を持つことも可能である。

【0081】

ステーター部材248、インペラ246を回転させる手段、及びインペラを浮揚させる手段は、図1ないし5において説明されたものと実質的に同じに機能する。回転ポンプ242は、位置センサー65を有する図1から5に示された回転ポンプ10と比較して、位置センサーも何も使わないことに注意すべきである。後方EMF又はコイルインダクタンスの変動に基づくセンサーなしの方法は、この実施例においては、磁気軸受間隙及びインペラ角度の測定に測定に使用される。モーターステーター及び磁気軸受ステーターにコイルがあるので、インペラの動きにより誘導される電圧及びコイル電流により自己誘導された電圧は、これを、インペラ角度及び磁気軸受間隙を計算するために使うことができる

データーブレード、ステーターハブ及びハウジング内面のような回転ポンプの種々の部品の一つ又は全部を定めるために使用することができる。この方法の別の態様が、ワシントンのベルビューにおける第6回AIAA/NASA/ISSMO"Symposium on Multidisciplinary Analysis And Optimization"におけるGregory W. Burgreen他の"CFD-Based Design Optimization of a Three Dimensional Rotary Blood Pump, AIAA Paper No. 96-4185, 1773-1779(1996)に説明される。これは参考文献としてここに組み入れられる。

【0078】

血液の流れのモデルは、好ましくは非圧縮性のナビエ・ストークス方程式及び質量保存の方程式である。前者の方程式の使用は、血液が單一相の一様かつ一次の粘性流体であると仮定する。この方程式を解くために、この目的でガレルキン有限要素プログラムが書かれた。このプログラムは、定常方程式の混合された公式の中の二次速度-一次圧力要素を使用する。これら要素の形式は、安定であることが知られ、そして最適次数の近似を作る。得られた非線形代数系は、ニュートン連続方法により解かれる。目的関数の解析的勾配は直接微分法を使って計算される。

【0079】

上の方法に使用される目的関数は、最小化される希望の設計基準を表す。例えば、損傷及び血小板活性化に関する目的関数は、限定するものではないが、滞留時間に関する剪断ストレス、粘性エネルギーの散逸速度、粒子の加速、抜き又はキャビテーションを起こす負圧、及び乱流強度の測定を含む。停滞及び堆積を定める目的関数は、限定するものではないが、渦度、逆流(即ち、境界層剪断が局所的にゼロになる)、逆方向の圧力勾配、連続したブレード対ブレードの軸方向速度の標準偏差、及び境界層の輸送を含む。このリストは実例であるが、本発明の回転ポンプに対する幾何学的構造の好ましい設計方法に利用し得る目的関数について網羅したものではない。

【0080】

図30は、図1ないし5に図示され、かつ上述の式(1)により表し得る回転ポンプ10と同様な本発明の別の実施例である。簡単のため、この2種の回転ボ

ンプの間の相違点だけが説明されるであろう。回転ポンプ242は、実質的に、ハウジング244、ハウジング244内に置かれたインペラ246、ステーター部材248、流入管250と流出管252、インペラ246をハウジング244内で浮揚させる手段、及びインペラ246を回転させる手段246を備える。インペラ246は、ノーズ254、テール256、及びインペラ246のノーズ254に置かれた誘導ブレード258を持つ。誘導ブレード258は、インペラーノーズ254の表面の周りを伸びる。誘導ブレード258、並びにインペラーブレード260は、形状が螺旋状であることが好ましい。誘導ブレード258は、ハウジングを通過する血液の流れを改良すると同時にキャビテーション感受性を減らすように機能する。流入管250はハウジング244の入口264に取り付けられ、そして流出管252はハウジング244の出口270に取り付けられる。流入管250は、第1の端部274と第2の端部276とを有する導管である。第1の端部274はハウジング入口264に取り付けられ、第2の端部276は心臓の左心室に取り付けることができる。第2の端部276は、砂時計形の外側形状を有するトランベット型の口の入口ノズル278を持つ。好ましくは、ノズル278の内径は、2.0mmから最終導管直径の1.2mmに先細にされる。流入管250と流出管252とは回転ポンプ242のハウジング244と一緒にされて示されるが、回転ポンプを患者に迅速に着脱できるような迅速連結機構(図示せず)を使った管を持つことも可能である。

【0082】

図31から33は、上述の式3により記述し得る本発明の別の実施例を示す。図31ないし33の回転ポンプは、入口281と出口283とを有するハウジング280、上流側の静止ブレード284の組と下流側の静止ブレード286の組とを有するステーター282、貫通空洞部を定めかつインペラーブレード290を有する実質的に円筒状のインペラ288を備える。ステーター282は、実質的にベル状のハブ285である。血液は、最初に領域283を通って流れる。円錐状軸受が、インペラ288の外側端部の中心を合わせると同時にインペラ288に対して出口の方向に推力を加える。円筒状の永久磁石軸受292及び294が、インペラ288の入口側端部に半径方向の中心力を与える。インペラ288上の入口281方向の軸方向の力が、同じ磁石軸受292と294により提供される。この形式の軸受は図7に示される。永久磁石軸受と能動的円錐状軸受との軸方向の力は円錐状軸受の制御により平衡にされる。図7の永久磁石軸受は半径方向では安定しているが軸方向では不安定であり、図7に示されるように、僅かなオフセットを与えることにより、オフセットの方向における軸方向の力を作ることができる。

【0083】

回転手段は、図32に詳細に示されるブラシなし直流モーターの形式を取る。

このモーターは、モーターローター磁束戻りリング302、ステーター鉄305、及びステーターコイル307を持つ。永久磁石296と298とは、半径方向に磁化される。一方は内向きで一方は外向きであって2極モーターを作る。領域302は、永久磁石の支持に適した非磁性材料である。領域302は、3%シリコン・鉄、又は50%コバルト・鉄のような軟質磁性材料より作られたモーター用の磁束戻りリング303である。ステーターコイル307の電流は、モーターを回転するために整流される。速度信号が、後方EMF信号の使用によりモーターインペラ角度からコイルに誘導される。これは、Micro Linear Corporationからの集積回路の利用により達成することができる。

【0084】

図33は、コイル306、軟質磁性材料から作られたステーター鉄308、及び軟質磁性材料から作られた軸受ステーター310を示している円錐状磁気軸受を通る断面図である。2次血流領域312との境界を有するローター鉄の表面は、生態親和性材料で被覆される。更に、この表面は、領域312を通る血液の流れを強化するために溝が作られ又は小さいインペラーブレードを持つことができる。

【0085】

図34及び35は、本発明の別の実施例を示す。この配列の利点は、ただ1個の能動的磁気軸受とブラシなし直流モーターとが固定ステーターの拡大部分内にあることである。図34は、ハウジングにATB2をいかに置き得るかを示す。ATB2はステーターと向き合ってハウジング内に配置されるので、ステーター内にはより大きな空間があり、モーターはより大きい線を使うことができ、従って損失熱を少なくすることができます。ローターは、ステーター320及びインペラ-322を備え、ハウジング324は入口326と出口328とを持つ。入口326は、方向330における血液のポンプ内への流入を許す。ステーター320は入口326において静止ブレード332により支持され、静止ブレード334は出口328において支持される。ステーター320内の永久磁石329及びインペラ322内の永久磁石331が、インペラ322を一方の端部において支持する。ステーター320内の永久磁石329及びインペラ322内の永久

点が真なり、上述の別の実施例に勝る改良例である。図41及び45に示されるように、この実施例においては、ローター502は、好ましくはステーターブレードを有するステーター504又は静止固定支持部材とハウジング506との間に磁気的に懸架され、ステーター504の周りを回転する。更に、ローター502を駆動するモーターステーター508は、図41に示されるようにハウジング506内に配置されることが好ましい。モーターステーター508をハウジング506内に配置することにより幾つかの利点が達成される。第1に、モーターステーター508により発生された熱は、モーターステーター508がステーター504内に配置された場合と比較して、これを血液からより容易に取り去ることができる。上述のように、モーターステーター508により発生した熱を血液から取り去ることにより、血液の凝固する限界温度以下に血液を維持することができ容易である。これは、血栓症の防止について重要である。第2に、ハウジング506内にモーターステーター508を置くことにより、ステーターの外部表面積を含んだステーター504をより小さくすることができる。ステーター504を小さくすることにより、外部表面積を含んだローター502をより小さく作ることができ。更に、血液が沿って流れるハウジング506の内面510を、より小さく作ることができる。ローター502、ステーター504及びハウジング506の内面510を小さくすることにより、血液と接触するポンプ500の表面積を、より小さく作ることができる。これが血液の異物面との接触による汚染の可能性を減らし、このためポンプ500の生体親和性を大きくする。

【0090】

上述の実施例のあるものは同様な特徴を持つ。例えば、図1及び30に示された実施例においては、モーターステーター508はハウジング506内に配置されたが、この実施例は、周囲をローター502が回転するステーター504は持たない。更に、図31及び34の実施例は、ローター502が周囲を回るステーター504を有するが、この実施例においては、ローター502を駆動するモーターステーター508はステーター504内に配置される。そこで、これら実施例は改良されたがなお上述の欠点がある。

【0091】

磁石331は、インペラ322を出口328において支持する。スラスト軸受346、コイル348及びスラストターゲット348aが、軸方向における支持を提供する。インペラを回転させる動力は、鉄又はその他の軟質材料、ローターリング352、永久磁石354、及びステーターコイル358よりなる直流ブラシなしモーターにより提供される。螺旋状のインペラーブレード360により圧送された血液が、出口328を通る血液を加速させる。

【0086】

血液の流れは1次経路362、及び連続間隙を形成する同隙部分364、366、368と370を通る2次経路に分割される。2次血液流路はインペラの非接触支持を許す目的を果たす。血液が、確実に適正方向で磁気間隙を通るように、372で示されるように小さいブレード又は溝を加えることができる。

【0087】

図36及び37は、出口400が軸方向ではなく半径方向にある図34に示された実施例の変更例である遠心ポンプを示す。このポンプは、ハウジング402、インペラ404、ステーター406、ローターを浮揚させかつ軸方向で位置決めする手段408、及び回転のための手段409を備える。スラスト軸受も、他の全ての磁気構成要素より下流に置かれ、かつスラスト軸受は永久磁石バイアス用磁石410を持つ。ポンプを通る1次血流のために、流路の間隙412が設けられる。2次血流用の間隙414も設けられるが、間隙414は有効な浮揚を提供するように小さい。図36及び37に示された実施例についての頭字語は上の(11)により表される。

【0088】

本発明の好ましい実施例及びその製作方法がここに説明されたが、本発明はこれらに限定されず、請求範囲によりその他の種々の変更例及びその同等品を具体化し得ることは明らかである。

【0089】

【図38-46の実施例】

図38-46は、本発明の血液ポンプ500の別の実施例を明らかにする。図38-40は、ポンプの外観図を示す。この実施例は、前の実施例とは幾つかの

図38-46のポンプ500の実施例も、ローターの軸方向位置を制御するために制御器及び位置センサーにより作動する半径方向磁気軸受、電磁スラスト軸受、及び血流のための比較的平滑な通路を形成する平滑な一致面を含んだ本発明の幾つかの別の特徴を持つ。この実施例のその他の新規な特徴は以下説明される。

1. モーター及びハウジング

好ましい実施例においては、図41及び42に示されたモーターはブラシなし2極直流モーターである。モーターステーター508は、モーターステーター508とローター502とが嵌るようにハウジング506の中央部分にあることが好ましい。本発明は、この特定の形式のモーターステーター508には限定されず、限定するものではないが溝付きステーターモーター及び別の磁極数のモーターを含む別の形式に使用することができる。例えば、4極モーターを使用できかつこれはスラスト軸受磁石からの妨害にも拘わらずモーター間隙内に特別な対称的な磁場を作るため有利である。示された好ましい実施例においては、モーターステーター508は、ステーター積層体516の周りに円環状に巻かれた6個のモーターステーターコイル514を持つ。ステーター積層体516は、比較的柔らかいニッケル合金で作られることが好ましい。しかし、限定するものではないシリコン又はコバルトの合金を含んだその他の適切な材料から作ることができ。モーターステーター508は適宜の通常の取付け技法でハウジングに取り付けることができる。一実施例においては、モーターステーター508は適切な接着剤でハウジングに接着される。

【0092】

好ましくは、モーターステーター508は、モーターステーター508とローター502との間の磁気吸引力を減らすように溝なしステーターである。図38-46の実施例に於てここで使用される用語モーターステーター520は、ステーターコイル514を巻くモーターの部分を指す。図38-46の実施例に於てここで使用される用語ステーター504は、ポンプの静止部分を指し、その周りをローター502が回転する。モーターステーター508は、溝の有無に拘わらず、ローター502をモーターステーター508の方に引張り更にローター

502がポンプステーター504のまわりで同心状に懸架される好ましい位置から離すような磁力を作る。モーターステーター508により作られるこの吸引力を減らすために、モーターステーター508は、渾なしにされることが好ましい。モーターステーター508に溝が付けられた場合は、モーターステーター508は、ローター502に作用する吸引力を減らすために、ローター502から更に離して位置決めしなければならないであろう。これはポンプ500の大きさを大きくし、これによりポンプ500の生体親和性を小さくするであろう。或いは、ローター502を半径方向で懸架する磁気軸受が大きくなり、これによってもポンプ500の大きさが増加し、ポンプ500の生体親和性を小さくするであろう。

【0093】

好ましい実施例においては、ハウジング506は、磁気伝導性及び透磁率の比較的低い材料から構成される。更に、ハウジングの材料は、比較的高い磁気抵抗を持つことが好ましい。例えば、セラミックス、チタンのような非金属材料、及び303ステンレス鋼のような非磁性ステンレス鋼が好ましい。かかる材料からハウジング506を作ることにより幾つかの利点が得られる。第1に、ハウジング506は比較的低い磁気伝導率を有するため、ハウジング内の渦電流損が比較的小さい。更に、ハウジングの低透磁率がモーターするによりモーターローターに誘導する磁場を大きくする。これにより、上述の特性を持たない材料で作られたハウジング506内に配置されたモーターステーター508を有する同様なポンプと比較してモーターステーター508を小さくできる。小さいモーターステーター508の使用により、ポンプハウジング506及びポンプの全体寸法を小さく作ることができる。前述のように、ポンプ寸法の減少は、人体及び血液と接触するポンプ500の表面積を減らすため、生体親和性の点で有利である。

【0094】

図41に示されるように、モーターステーター508は、ローターモーター磁石521と相互作用してローターを回転させ、これにより血液を圧送する。一般に知られるように、渦電流損は電磁モーターの効率を低下させる。渦電流損による非効率は、モーターステーター508の大きさ、従ってポンプ500の大きさ

図38-46に示された実施例は、上述されたものと同様であり、ポンプ500の入口526及び出口528においてハウジング506と結合されたステーター504を持つ。図38-46の実施例に関連してここで使用される用語ステーター504は、周囲をローター502が回転するポンプの静止部分を指す。用語ステーター504は、モーターステーター508を必ず含むことは意図されない。むしろ、用語ステーター504は、それがモーターステーターの有無とは無関係に静止部材を指す。この実施例においては、図41-43を参照して最もよく理解されるように、第1の端部530、第2の端部532、及び第1の端部530と第2の端部532とを結ぶ固定ハブ支持具524を持つことが好ましい。第1の端部530は、図40、41、43及び44Bに示されるように、好ましくは入口526に配置され、そして第1の端部530の周囲の周りに配置された複数のローターブレード534を持つ。示された実施例においては、第1の端部530は、好ましくは図43に示されるように実質的に円錐状のノーズを有し、このため、血液がポンプ500に入るときに第1の端部530上における流体の剥離が最小か又はない状態で血液が滑らかに通過することができる。図40、41及び44Bに示されたステーターブレード534は、第1の端部530の周りに配置され、そして以下詳細に説明されるように、ポンプ内に流れ込む血液をローター502に指向させる。第1の端部530は、実質的に円錐状のノーズを有するため、530のこの部分は、変化する直径を持つ。しかし、第1の端部530の最大直径は、図43に示されるように好ましくは d_{max} であり、かつステーター504の第1の端部530の上流側の端部に配置されることが好ましい。

【0097】

固定ハブ524は、図42に示されるように、第1の端部530から第2の端部532に伸びる。ローター502は固定ハブ524の周りに配置される、固定ハブ524は、図45に示されるように直径 d_{hub} を持つ。

【0098】

ステーター504の第2の端部532も、図41、43及び44Aに示されるように実質的に円錐状にされ、そしてその周囲に配置された複数のステーターブレード536を持つ。これらステーターブレード536は、血流をローター502

を大きくしなければならないという血液ポンプに望ましくない影響を与える。渦電流損を最小にするために、ローター502は、同様に図41に示され、かつローター502の内側部分を形成する内部鉄部材522を持つことができる。この内部鉄部材522は、ステーター504の固定ハブ524を囲み、これにより固定ハブ524を、モーター磁石521及びモーターステーター508により作られた磁場から遮蔽する。これは、モーターステーター508、モーター磁石521、及び固定ハブ524の永久磁石により作られる磁場との相互作用から形成される渦電流損を防ぎ又は軽減する。渦電流損を防止し又は軽減することにより、モーターステーター508及びモーター磁石521はより効率的に作動し、これによりポンプ500の大きさを最小化することができる。

【0095】

ハウジングは適宜の数の部分から形成できるが、図41に示された実施例においては、ハウジングは、4個の部分506a、506b、506c及び506dを含む。部分506aと506bとは、それぞれポンプの入口と出口を定め、設置の目的で少なくもそれぞれの外部の部分に沿って配置されたネジを持つことができる。部分506a、506b及び506cは、ポンプの中央部分を形成する。部分506aは、506bと506c、部分506cと506dと同様に、Oリング506fと溝506gにより、部分506b及び部分506dに封着される。モーターに給電するための電気コネクター506hは、ハウジングのある部分を通過することができ、図41に示された好ましい実施例においては、コネクター506hは部分506dを通過する。

2. ローター及びステーター

図38-46の実施例は、幾つかの別の利点も持つ。例えば、図41及び46に示されたような滑らかな流体通路が、ステーター504とハウジング506との間、ステーター504とローター502との間、及びローター502とハウジング506との間に定められる。以下説明されるように、流体のこの平滑な通路は、ハウジング506、ローター502、及びステーター504の間の幾何学的関係、及び比較的鋭い突起又はエッジの最小化により定められる。

【0096】

2からポンプ500の出口528に向ける。ステーター504の第2の端部532もハウジング506に機械的に結合される。ステーター504の第2の端部532は実質的に円錐状であるため、ステーター504の第2の端部532上の血流は、ステーター504から円滑にポンプ500の出口に通過することができる。

【0099】

ステーター504の第2の端部532は固定ハブ524に結合され、そして第2の端部532は実質的に円錐状であるため、これは変化している直径を持つ。ステーターの第2の端部532の最大直径 d_{max} は、図41及び43を参照し最もよく理解されるように、固定ハブ524の近くに配置される。固定ハブ524は、適宜の機械的な固定用技法で第1の端部530及び第2の端部532に連結される。示された好ましい実施例においては、固定ハブ524は、それぞれピン524a及びブッシングガイド524bにより第1の端部及び第2の端部に連結される。固定ハブ524のそれぞれの端部ピン524a及びブッシングガイド524bは、締り嵌めで固定ハブ524を第1の端部530に連結し、更に締り嵌めで固定ハブ524を第2の端部532に連結する。

【0100】

ローター502は、図41及び43に示されるように、好ましくは固定ハブ524の周りに配置され、そして実質的に円筒状の部分538、及び実質的に円錐状の部分540を持つ。ローター502は、好ましくは円板状の環状断面を持つ。以下、より詳細に説明されるように、ローター502は、固定ハブ524の周りに磁気的に懸架され、ローターブレード542は実質的に円錐状部分540から実質的に円筒状部分538に伸びる。固定ハブ524の周りに配置されたとき、ローター502の実質的に円筒状部分538は、図43に示されるように直径 d_{rotor} を持つ。好ましくは、 d_{rotor} は、ステーター504の第2の端部532の d_{max} とほぼ等しく、このため、血液がポンプを通過するときの、ローター502からステーター504の第2の端部532に至る血液の滑らかな流れが生ずる。

【0101】

上述のようにステーター 504 及びローター 502 を形成しつつ大きさを定めることにより、血小板の活性化、凝固及び血栓症の可能性を減らす比較的平滑な表面が作られる。ローターの直径 d_{rotor} がステーター 504 の第 2 の端部の直径 d_{max} にはば等しいようにローター 502 が懸架されない場合は、ローター 502 とステーター 504 との間に、ローター 502 とステーター 504 との間にどちらかと言えば突然な推移が作られ、これが血球を破損させる可能性を大きくするであろう。

【0102】

血液の破損を防ぐ比較的滑らかな表面は、ステーター 504 の実質的に円錐状の第 1 の端部 530 も含む。ステーター 504 の第 1 の端部 530 は、血液が向け直されるときの剪断ストレスを最小にするように、血液がポンプに入る際に接触する比較的滑らかな表面を作る。第 1 の端部 530 のこの円錐状の比較的平滑な表面は、血液を、ローター 502 の実質的に円錐状の部分 540 に流れるように指向させる。ローター 502 とステーター 504 の第 2 の端部の部分とはほぼ同じ直径を持っているため、比較的滑らかな通路が造られ、これにより、血液は、ローター 502 からステーター 504 の第 2 の端部に流れることができる。ステーター 504 の第 2 の端部に流れた後で、ステーター 504 の実質的に円錐状の第 2 の端部 532 は比較的滑らかな表面を提供し、その上を血液が流れ、血液はポンプ 500 の出口、及び大きい直径部分から小さい部分に向け直される。

【0103】

上述されたように、ハウジング 506 は、ローター 502 とステーター 504 とを囲む。ハウジング 506 は、図 41 に示されるように、ポンプの入口 526 からポンプの出口 528 に伸びる内面 510 を持つ。以下更に詳細に説明されるように、1 次流路は、ハウジング 506 とローター 502 との間、及びハウジング 506 とステーター 504 との間に定められる。内面 510 は、ローター 502 及びステーター 504 の種々の部分の形状と一致する形状を持つことが好ましく、これにより、ステーター 504 とローター 502 との間に定められた 1 次流路は比較的平滑であり、血液は流路の断面積の比較的小さな変化に遭遇する。上述のように、血液ポンプの設計に当たっては、比較的鋭い突起及びエッジを避け

る。ローター 502 の第 2 の端部 532 の近くに配置されることが好ましい。ハウジング 506 の内面 510 の第 3 の部分 548 は、ハウジング 506 の内面 510 の第 1 の部分 540 と同様に、ステーター 504 の実質的に円錐状の第 2 の端部 532 との間に比較的滑らかな流路を作るよう、ステーター 504 の実質的に円錐状の第 2 の端部 532 と一致する。流れは、ステーター 504 の実質的に円錐状の第 2 の端部 532 とハウジング 506 の内面 510 の第 3 の部分 548 との間に流れが、軸線方向から軸線方向にわたる角度関係にある方向に向け直される。更に、流れは、ステーターブレード 536 により整流される。ステーターとハウジングとの間の血流に主に間違ることの一つは、流れの分路、逆流、停滞及びこれらの減少から生ずる可能性のある血栓症の防止である。流れの停滞、逆流及び血栓症を減らすために、ポンプの筒形形状の両面が、ステーターとハウジングとの間に比較的滑らかな流路を定める。

【0107】

上述のようにポンプを構成した場合、血液ポンプは混合流ポンプである。混合流ポンプは、軸流ポンプと遠心ポンプの両者の特徴を組み合わせたものである。一般に知られるように、軸流ポンプは流体が軸線に沿って入り、流体の流れの一般方向はポンプを通る軸線と平行である。遠心ポンプでは、一般に、流体は、ポンプローターの対称軸と一般に平行な方向でポンプに入り、そして流れがポンプに入る方向と一般に直角な方向でポンプから出る。混合流ポンプは、これらポンプの特徴を組み合わせ、これら形式のポンプにおいて定められた流れの一般的な方向とは別の方向の流れを持つ。例えば、図 45 に示されるように、流れは全体として軸線方向でポンプに入り、そして血液がローター 502 の実質的に円錐状の部分 540 を通過するときに、ポンプの長手方向軸線とある角度方向に向け直される。その後、血液がローター 502 の実質的に円筒状の部分 538 に沿って通過するとき、流れは一般に軸線方向に戻る。血液は、実質的に円筒状部分 538 を通過して流れた後、ステーター 504 の実質的に円錐状の第 2 の端部 532 に沿って再び角度方向となる。続いて、流れは、血液がポンプから出るとき、再び軸線方向に向け直される。

【0108】

ることが重要である。これらは血液に剪断ストレスを生じ、かつ血液を凝固させる可能性のある局所的な停滞域を作ることが可能である。

【0104】

本発明のポンプ 500 がエッジ及び比較的鋭い突起を回避する方法の一つは、ステーター 504 及びローター 502 の部分の形状と一致するハウジング 506 の内面 510 を有することである。例えば、ハウジング 506 の内面 510 は、ローター 502 とハウジング 506 との間に比較的滑らかな血液通路を作るようローター 502 の実質的に円錐状の部分 540 に沿って湾曲する第 1 の部分 524 を持つ。これは、ローター 502 の実質的に円錐状の部分 540 上のローターブレード 542 が血液にエネルギーを与えかつ血液を、実質的に軸方向の流れからポンプの長手方向軸線に関してある角度関係にある斜め方向に向け直せるので、ポンプ 500 のこの領域において特に重要である。血液の流れの方向を変えることとインペラーブレード 542 の圧送作用とは、血液に剪断ストレスを起こす可能性を持つ。血球に対する損傷の可能性を減らすために、ハウジング 506 の内面 510 は、ローター 502 の実質的に円錐状部分と一致するように曲げられる。これにより、血液が圧送されてローター 502 の実質的に円錐状の部分 540 とハウジング 506 の内面 510 との間を流れるとときの血液の比較的円滑な方向変換が提供される。

【0105】

ハウジング 506 の内面 510 は、ローター 502 の実質的に円筒状の部分の近くに配置された第 2 の部分 546 も持つ。ハウジング 506 のこの第 2 の部分 546 は、ローター 502 の実質的に円筒状の部分 538 の形状と一致するように実質的に円筒状であることが好ましい。これにより、ローターの実質的に円筒状の部分 538 とハウジング 506 の内面 510 との間に比較的滑らかな通路が作られる。上述のように、比較的滑らかな流路の作成が剪断ストレス及び血球の損傷の可能性を最小にする。

【0106】

ハウジング 506 の内面 510 の第 3 の部分 548 は、ハウジング 506 の内面 510 の第 2 の部分 546 から伸び、そしてステーター 504 の実質的に円錐

状の第 2 の端部 532 の近くに配置されることが好ましい。ハウジング 506 の内面 510 の第 3 の部分 548 は、ハウジング 506 の内面 510 の第 1 の部分 540 と同様に、ステーター 504 の実質的に円錐状の第 2 の端部 532 との間に比較的滑らかな流路を作るよう、ステーター 504 の実質的に円錐状の第 2 の端部 532 と一致する。流れは、ステーター 504 の実質的に円錐状の第 2 の端部 532 とハウジング 506 の内面 510 の第 3 の部分 548 との間に流れが、軸線方向から軸線方向にわたる角度関係にある方向に向け直される。更に、流れは、ステーターブレード 536 により整流される。ステーターとハウジングとの間の血流に主に間違ることの一つは、流れの分路、逆流、停滞及びこれらの減少から生ずる可能性のある血栓症の防止である。流れの停滞、逆流及び血栓症を減らすために、ポンプの筒形形状の両面が、ステーターとハウジングとの間に比較的滑らかな流路を定める。

【0109】

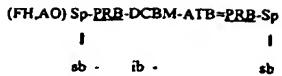
上述のように、ポンプ効率の向上によりポンプをより小さくすることができ、これにより生体親和性が強化される。例えば、圧力は、卓越してローター 502 のような実質的に円錐状の部分 540 により作られる。ポンプのこの部分で圧力の有効な部分を作ることで、ローター 502 の実質的に円筒状の部分 538 を比較的小さく作ることができ、これにより、モーターが横切って作動する 1 次流路の大きさをより小さくできポンプの効率を上げることができる。対比して、ポンプを軸流で設計した場合は、同じ運転条件を得るために、ローター及びモーターの寸法が大きくなる。この好ましい実施例は混合流ポンプについて説明されたが、明示された場合を除いて、混合流ポンプに対するポンプのその他の特徴の応用を限定することは意図されない。本発明は、ハウジング付きのポンプであって、その中にモーターが配置されかつ内部ステーターの周りを回転するローターを有し混合流ポンプではないポンプを含む。好ましい実施例においては、ローターの円錐状部分とハウジングとの間の圧力上昇は、流量が約 3 から 10 リットル毎分において水銀柱で約 80 ～ 140 mm の範囲である。

【0110】

図 38-46 のポンプは前述の頭字語の用語で記述することができる。これら用語を使用したとき、ポンプは次のように記述される。

【0111】

【化 5】



【0112】

この実施例においては、後部軸受の外側レースは、能動的スラスト軸受と磁石を共有するのでハイブリッド化される。このハイブリッド化は必ず使われるわけではないが、分離磁石を使うことができる。それでもハイブリッド化により、部品数が少くなり、製造上及び経済上の利点を提供する。

3. 流路

上述の実施例のあるものと同様に、図38-46のポンプは、図45に最もよく示されるように2個の流路を持つ。図45に最もよく示されるように、ローター502とハイブリッド506との間の1次流路550があり、そしてローター502とステーター504との間の2次流路552がある。1次流路550は2次流路552より大きく、ポンプを通過する血液の大部分は1次流路550を通って流れる。2次流路552は、ローター502の浮揚を許す磁気軸受の使用に必要である。ローター502を懸架するためにローターと連携する磁気軸受を横切る2次流路552の作成は重要であり、2次流路552がなければ、磁気軸受は1次流路を横切り、又はポンプ内の流路のみで作動しなければならない。磁気軸受は効率のために互いに比較的近いことを必要とするため、2次流路なしの場合、ローターはハウジングに比較的近く配置することが必要であり、流路の大きさが限定され、このため、流量が限定されるであろう。そこで、2次流路の作成により、1次流路の大きさ及び流量を限定することなしにローターを磁気懸架することができる。流路の大きさは、2次流路の代わりに大きい軸受の使用により大きくすることができるが、これはポンプの大きさを増やし、前述の生体親和性の欠点を生ずる。

【0113】

2次流路552の寸法は、ポンプ500の作動及び生体親和性の両面について重要なである。2次流路552が小さ過ぎると、比較的小さい流路による血液の剪

増加せねばならず、これは上述された欠点を持つ。従って、好ましい実施例においては、ポンプ500は、適切であるが必須ではないフラッシングを提供しこれにより2次流路552の大きさを比較的小さく維持するために2次流路552を逆流が通るように設計される。

4. ブレード

図43に最もよく示されるように、好ましくは複数のローターブレード542がローター502上に配置される、これらローターブレード542は、ローター502の実質的に円錐状の部分540からローター502の実質的に円筒状の部分538上に伸びる。好ましくは、モーターブレード542は、ローター502の実質的に円筒状の部分538の周りに実質的に螺旋状パターンに曲げられ又は巻かれる。ローターブレード542の湾曲（巻回）は、図43に示されるように、ローター502の実質的に円筒状の部分538に達すると減らされる。

【0115】

この湾曲（巻回）は種々の理由で好ましい。ローター502の円錐状の端部540上の螺旋状ブレード542の機能は、第1に、血液に圧力エネルギー、回転速度及び軸方向速度を与えることである。対照的に、ローター502の実質的に円筒状部分538上のブレード542の部分の第1の機能は、血液に更なる回転方向の運動のエネルギーを与えて血液の流れをステーター504の第2の端部532に配置されたステーターのブレードの先端に向けるように指向させるガイドとして作用することである。

【0116】

各ローターブレード542は、先端556と根元558とを有し、その一つが図43に示される。各ローターブレード542の先端556は丸みを付けられることが好ましい。同様に、各ブレード556は、各ブレード542の根元558の両側で根元558がローター502の外周面と接触する所に配置されたフィレット560を持つ。各ブレード542の先端556に丸みを与え、根元558にフィレット560を与えることにより、表面と直角に出会いやすい平らな先端及び根元と組み合った比較的鋭いエッジが全体的に無くなる。鋭いエッジは血液内で剪断ストレスを発生させ、またフィレットなしの交差は局所的な比較的淀んだ血液

断ストレスの大きさが過剰となり、赤血球の損傷、停滞及び血栓症をもたらす。反対に、2次流路552が大きすぎると、ローター502がステーター504から更に遠くに配置されるであろう。この増加した距離が磁気軸受の効率低下をもたらし、同じ磁力をするために磁気軸受を大きくする。これはポンプの大きさを大きくさせ、上述の生体親和性の欠点を持つ。更に、2次流路が大きすぎると、余分なフラッシング又は渦流の損失を招き、ポンプの水力学的効率を下げ、かつ1次流路と2次流路との境界に望ましくない乱流を発生させる。本発明の好ましい実施例においては、ステーター504とローター502との間の距離は約0.127mmから0.762mm（約0.005インチから0.03インチ）の範囲内である。2次流路552の好ましい大きさがポンプ500の全寸法に依存するであろうことは言うまでもない。更に、1次流路を決定するローターの外側からハウジングまでの好ましい距離は約1.2573mm（0.0495インチ）である。重要なことは、2次流路552が過剰な剪断ストレスの防止に十分であり、なお軸受の効率低下、及びこれによるポンプ500の総寸法の増加を防止するに十分な小さいことである。

【0114】

先に引用されたように、2次流路552における流れは、2次流路552の下流側の端部554から2次流路552を通り、2次流路552の上流側の端部556から出る。言い換えると、2次流路を通る流れは逆行し、1次流路550内の流れと反対である。ポンプ500のこの実施例は、2次流路552のフラッシングを増加させるためにローター502とステーター504との間を逆流するように設計される。ステーター504の周りに磁気懸架されたローター502を設計するために、2次流路552は、磁気軸受の効率化のためと過剰な剪断ストレスの防止のために必要な大きさでなければならないことが見いだされた。2次流路552の別の問題は、2次流路552を通る流速が適切にフラッシングを防ぎかつ停滞及び停滯に由来する血小板の凝固を防止するに十分であることを確保することである。設計と実験とにより、2次流路552内の流れが1次流路550内の流れと同じ方向であるときは、停滞を防止しつつ適切なフラッシングを提供することが困難であることが見いだされた。例えば、2次流路552の大きさを

領域（これは凝固又は血栓症を起こすことがある）を発生させる可能性があるため、これら比較的鋭いエッジがなくなることは有利である。このため、それぞれのブレード542の長さに沿ったブレード542の先端556の丸み付けと根元558におけるフィレット560の作成は、剪断ストレス及び剪断ストレスに組み合った諸問題を減らす。好ましい実施例においては、ブレードは、ブレードの幅の約半分に対して、ほぼ約0.051mm（0.002インチ）の範囲内の湾曲で曲げられる。

【0117】

ステーター504の第2の端部532に配置されたステーターのブレード536は、図43及び44Aに示されるように、逆螺旋曲線を持つ。この湾曲（巻回）のため、ステーターのブレード536は、血液がポンプ500を出るときの流れを整え、周囲方向における血液の回転方向の運動のエネルギーを減らし、これにより血液から圧力エネルギーを回収する。ブレードの厚さは、流路断面積の軸方向変動を最小にすることによって設計される。これが、ハブ及びブレードからの流れの剥離の可能性を最小にし、血液損傷の可能性を減らす。

【0118】

図43及び44Aに示された実施例においては、ステーターの第2の端部のステーターのブレード536は、流路の正味断面積を一定に保ち、これにより流れの剥離を防ぐように変化する厚さを持つ。例えば、ハウジングの形状がステーターのブレード536の近くで変化したとき、ステーターのブレードの厚さは、断面積を比較的一定に維持するように調整される。ハウジングの形状が流路の大きさを増加させようとしたとき、流路の断面積を比較的一定に維持するためにステーターの厚さが大きくなる。

5. 磁気軸受

上述のように、図38-46のポンプは、ローター502をハウジング506とステーター504との間で軸方向及び半径方向に磁気的に懸架しつつ位置決めする磁気軸受を持つ。ラジアル磁気軸受560及びスラスト軸受562の好ましい実施例が以下提供されるが、その他の磁気軸受を使用することができる。下の好ましい実施例においては、ラジアル磁気軸受560は受動性軸受であり、そし

でスラスト軸受562は能動性軸受であって、ポンプの作動中、ローター502の位置を検知してポンプ内でローター502を位置決めするためにローター502に軸方向の力を提供する。

【0119】

図38-46に示された実施例には、2個のラジアル軸受560が提供される。この2組のラジアル軸受560は、図46に図式的に示されるように、ステーター504内に配置された永久磁石の積層体及びローター502内に配置された永久磁石の積層体を備える。これら永久磁石の積層体は、ローター後方の積層体564、ローター前方の積層体566、ステーター後方の積層体568、及びステーター前方の積層体569を備える。図46の矢印は特別な構成要素により作られる磁場の方向を示す。矢印の頭部はNを示し、尾部はSを示す。

【0120】

永久磁石のローター後方積層体564は、好みしい実施例においては3個の磁石570、572、574を含む。これら3の磁石の組合せは、後方外側レースと呼ばれるものを形成する。これらは、永久磁石570、572、574の各がリング状に形成されるため、外側レースと呼ばれる。後方積層体564又はレースのローター磁石は、図46に示されるように交互方向に磁化されることが好みしい。永久磁石の後方ローター積層体564は、以下詳細に説明されるように2個のスラスト磁極582、584も含むことが好みしい。永久磁石の後方ローター積層体564に永久磁石の後方ステーター積層体568が備えられる。ステーター後方積層体568は、ローター後方積層体564と同様に3個の永久磁石576、578、580を含む。後方ステーター積層体568は、3個の後方ステーター積層体磁石のうちの2個の間に配置されたスペーサー575も持つ。後方ステーター積層体568を定める磁石も好みしくはリング状に形成され、そして纏めて後方内側レースと呼ばれる。

【0121】

同様に、永久磁石の前方ローター積層体566は、好みしい実施例においては、前方外側レースを定める3個の永久磁石586、588、590を含む。これらの磁石は、図46に示されるように、好みしくは、後方外側レース564を定

作られた双極モーメントと相互作用する双極モーメントを作ることができる。この相互作用は、ローター502を、ステーター504とハウジング506との間のその好みしい懸架位置から離すように曲げるピッチ及びヨー方向のローター502に加わる望ましくないモーメントを作るであろう。この望ましくない曲げモーメントを防止するために、前方内側レースを定める外側磁石586、590の厚さは、前方内側レース569により作られるモーメントがほぼゼロであるように調節される。これにより、ローターモーター磁石521と前方内側レース569との間のいかなる相互作用も無効にされ又は最小にされ、そしてこれにより相互作用から生ずる望ましくない曲げモーメントを防止し又は最小にする。好みしい実施例においては、前方磁気軸受を定める磁石の厚さ t_1 及び t_2 は、内側レースと外側レースとの間の距離の約2倍、又は2次流路の大きさの2倍である。磁石の積層体の全長は、好みしくは、ローターを、その回転中、支持するに十分な剛性を達成するように示される。同様に、前方内側レース569を定める2個の磁石の厚さ t_1 及び t_2 は対応する外側磁石の厚さ t_1 及び t_2 と適合するように調節される。

【0125】

ハウジング内でローター502を軸方向で位置決めするために、ポンプはスラスト軸受562も持たねばならない。好みしくは、スラスト軸受562は能動的磁気軸受であって、ローター502の適正な位置を維持するようにローター502に加わる軸方向の力を調節する。好みしい実施例においては、スラスト軸受562は、後方外側レース564、1対のスラスト磁極582、584、1対のスラストコイル598、600、位置センサー602、604、及び位置センサー602に応答して、ローター502に加わる力を制御する制御器620を備える。

【0126】

上述のように、後方外側レース564及びスラスト磁極582、584はローター502内に置かれ、更に後方内側レース568はステーター504内に配置される。スラストコイル598、600は、図41に示されるように、ハウジング506内に配置された電磁コイルである。好みしい実施例においては、スラ

スの磁石とは交互方向に磁化される。ステーター前方積層体569も、互いに交互方向に磁化された3個の磁石592、594、596を備える。ステーター磁石の前方積層体569は、前方内側レースを定める。

【0122】

後方外側レース564と内側レース568とは後方ラジアル軸受を定め、前方外側レース566と内側レース569とは前方ラジアル軸受を定める。これら軸受の各は、図41に示されるように、ローター502をステーター504から磁気的に懸架するために、ローター502を固定ハブ524から分離する2次流路552を横切って磁気的に連携する。連携しなければならないそれぞれの内側レースと外側レースとの間を横切る2次流路552又は間隙の大きさは、ポンプの適正な作動のために重要である。上述されたように、この間隙は、ポンプを浮揚させるために半径方向の磁力の効果的な伝達を提供するに十分に小さくすべきであり、このため、軸受及びポンプの大きさを最小にし、かつ血液に過剰な剪断ストレスを生ずるほど小さくすることができる。この間隙の好みしい大きさは上に提供される。

【0123】

前方外側レース566及び後方内側レース569により定められる前方ラジアル軸受は、Backer FTのA Magnetic Journal Bearing, Phillips Technical Review, Vol.22, pp.323-328(1960-61)及びYonnet J.P.他のStacked Structures of Passive Magnet Bearings, J. Appl. Physics 70(10):6633-6635(1991)において説明されたと同様又は異なる磁気軸受構造である。ステーター504の周りにローター502を磁気的に懸架するラジアル磁気軸受の好みしい実施例が以上提供された。しかし、その他の磁気軸受構成が可能である。例えば、異なる数の磁石を使うこと及び/又は異なる極の磁石を使うことができる。更に能動的磁気軸受を使うこともできる。

【0124】

前方ラジアル磁気軸受に関するローターモーター磁石521の位置決めのため、前方内側レース569は、ローターモーター磁石521と磁気的に相互作用する可能性を持つ。例えば、モーターステーター508は、内側レース磁石により

ト磁極582の一方はN極であり、他方はS極である。スラスト磁極598はスラスト磁極582と相互作用し、そしてスラストコイル600はスラスト磁極584と相互作用することが好みしい。スラストコイル598、600の各が関係のスラスト磁極582、584と相互作用して同じ方向の軸方向の力を作用するようにこれらコイルを通過する電流は、逆方向であることが好みしい。後方の内側レース564と外側レース568により作られる磁場がスラストコイル598、600及びスラスト磁極582、584により作られた磁場と相互作用して、ローター502をハウジング506内で位置決めする軸方向の力を提供する。

【0127】

図41に示される位置感知用コイル602、604は、ステーター504の第2の端部内及びステーターの面606に配置されることが好みしい。感知用コイル602、604は、渦電流式のものとできるがその他の適切なセンサーを使うことができる。

【0128】

ローター502を軸方向で適切に位置決めするために、スラストコイルを通る電流を制御する制御器が配置される。好みしい実施例においては、制御器は、上述のような通常のフィードバック型の制御器、即ち、ローターを軸方向において位置決めするために感知用コイル602、604に応答する制御器である。感知用コイルは、制御器に、ローターの軸方向位置の表示である信号を送る。制御器は、好みしい軸方向位置にローターを置き直すためにスラストコイルの電流を調節する。

【0129】

別の好みしい実施例においては、図46に示された仮想ゼロパワー(VZP)制御器620が、フィードバック制御器とともに使用される。VZP制御器は、ローター12を、ポンプの軸方向軸線に沿ったゼロ速度点に位置決めする。ゼロ速度点は、ラジアル軸受により作られた安定負荷及び不安定力が平衡し正味ゼロの力が作られる不安定平衡点である。VZP制御器使用の利点は、外部からの擾乱がないとしたとき、この位置を維持するに要する電力が、制御器の電子回路の休止電力にほぼ等しく、従って比較的小さいことである。

【0130】

ローターを最初に懸架するために、作動中、ローターの位置を測定する感知用コイル602、604、及び通常の位置フィードバックが使用される。ローターの懸架の安定後は、VZP制御器620がローターの位置を維持する。

【0131】

VZP制御器は、ゼロ速度点にローターを位置決めするために速度フィードバックを使用する形式のものとすることができ、これはCarl H. Henrikson, Joseph Lyman & Philip A. StuderのMagnetically Suspended Momentum Wheels For Spacecraft Stabilization, the AIAA 12th Aerospace Sciences Meeting, Washington DC. 1.30-2.1, 1974 (AIAA Paper No. 74-128, p.4-5(1974)として入手可能) 及びJoseph Lymanの1975年1月14日付け、米国特許3 860 300号、Virtually Zero Powered Magnetic Suspension (仮想ゼロ出力の磁気懸架) に説明され、これらは両者とも参考文献としてここに取り入れられる。或いは、VZP制御器は、スラストコイル598、600における電流の関数である信号の積分フィードバックを使う形式のものとすることができる。この形式の制御器は、Ball Brothers Research Corp. Annular Momentum Control Device(AMCD), Vol.1, Laboratory Model Development, NASA CR-144917, pp.4-6-4-9(1976)に説明される。これは参考文献として組み入れられる。いずれの形式においても、好ましい位置はゼロ速度位置である。

【0132】

本発明の血液ポンプの種々の新規な特徴が以上説明された。全ての新規な特徴を1台のポンプと組み合わせる必要のないことが認められるであろう。むしろ、幾つかの新規な特徴がその他の新規な特徴を使うことなく別のポンプ内に含まれることができる。

【0133】

本発明の多くの特徴及び利点が、本発明の構造及び機能の詳細とともに以上の説明において述べられたが、ここに明らかにしたのは説明のためのものであり、請求範囲に示された用語の広い一般的な意味により示された本発明の原理内で諸部品の詳細、特に形状、大きさ及び配置の諸項目における変化が可能である。

【図11】

受動的スラスト軸受の別の図面である。

【図12】

2個の構成要素が互いに外形を合せられた能動的スラスト半軸受の断面図である。

【図13】

磁極片が極突起を提供するように切り込まれた別の受動的スラスト軸受である。

【図14】

別の能動的スラスト軸受である。

【図15】

能動的スラスト半軸受である。

【図16】

別の能動的スラスト半軸受である。

【図17】

能動的スラスト軸受の第1の実施例である。

【図17A】

能動的スラスト軸受の第2の実施例である。

【図17B】

能動的スラスト軸受の第3の実施例である。

【図17C】

能動的スラスト軸受の第4の実施例である。

【図18】

能動的ラジアル軸受と受動的スラスト軸受とのハイブリッドである。

【図19】

能動的スラスト半軸受と受動的ラジアル軸受とのハイブリッドである。

【図20】

誘導モーターのステーターと能動的スラスト半軸受とのハイブリッドである。

【図21】

【図面の簡単な説明】

【図1】

磁気懸架されたインペラーセルを有する回転流体ポンプの好ましい実施例の断面図である。

【図2】

図1に示された回転流体ポンプのインペラーセルの斜視図である。

【図3】

図1に示された回転流体ポンプのモーターステーター及びモーターローターの線I—I—I—Iに沿って得られた断面図である。

【図4】

図1に示された回転流体ポンプのステーター部材及びインペラーセルの線IV—IVに沿って得られた断面図である。

【図5】

図1に示された回転流体ポンプにおいて使用される磁気軸受制御の図式図である。

【図6】

永久磁石軸受のステーター部材である受動的ラジアル軸受の図式図である。

【図7】

軸方向オフセットを有する図6の受動的ラジアル軸受の図式図である。

【図8】

磁極片が極突起を提供するように切込みの入れられた受動的ラジアル軸受の断面図である。

【図9】

軸方向オフセットを有する受動的ラジアル軸受と同等なスラストバイアスを有する別の突起型受動的ラジアル軸受の断面図である。

【図10a】

大きい流体流れ領域を有する能動的ラジアル軸受の断面図である。

【図10b】

図10aの能動的ラジアル軸受の線X—Xに沿って得られた断面図である。

図20に示されたステーターの線XXI—XXIに沿って得られた断面図である。

【図22】

誘導モーターと能動的スラスト半軸受とのハイブリッドである。

【図23】

図22に示された電機子の線XXII—XXIIに沿って得られた断面図である。

【図24】

図1に示された回転ポンプ用の別のモーターである4個のインペラーブレードを有する2極モーターの断面図である。

【図25】

インペラーブレードとハイブリッドにされた可変リラクタンスモーターの断面図である。

【図26】

インペラーブレードとハイブリッドにされた誘導モーターの断面図である。

【図27】

別の可変リラクタンスモーターの断面図である。

【図28】

別の誘導モーターの断面図である。

【図29】

本発明の好ましい実施例の幾何学的形状を設計するために使用されるコンピューター化された水力学的方法を示す流れ図である。

【図30】

インペラーセル上に置かれた誘導ブレード及びハウジングの入口に位置決めされた流入管路と出口に位置決めされた流出管路を有する本発明の好ましい回転流体ポンプの別の実施例の部分的に切除された断面図である。

【図31】

本発明の好ましい回転ポンプの別の実施例の断面図である。

【図32】

図31に示された回転流体ポンプのブラシなし直流モーターの線XXXII-XXXIIIに沿って得られた断面図である。

【図33】

図31に示された回転流体ポンプの軸方向円錐状磁気軸受の線XXXII-XXXIIIに沿って得られた断面図である。

【図34】

本発明の好ましい回転流体ポンプの別の実施例である。

【図35】

図34の回転流体ポンプの線XXXV-XXXVに沿って得られた断面図である。

【図36】

回転ポンプが遠心ポンプの形式を取る本発明の回転ポンプの別の実施例の断面図である。

【図37】

図36の遠心ポンプの線XXXVI-XXXVIに沿って得られた断面図である。

【図38】

本発明の血液ポンプの別の好ましい実施例である。

【図39】

図38の好ましい実施例の出口の端面図である。

【図40】

図39の好ましい実施例の入口の端面図である。

【図41】

図39の線41-41に沿って得られた断面図である。

【図42】

図41の線42-42に沿って得られた断面図である。

【図43】

図39の好ましい実施例のローター及びステーターの好ましい実施例の側面図である。

【図1】

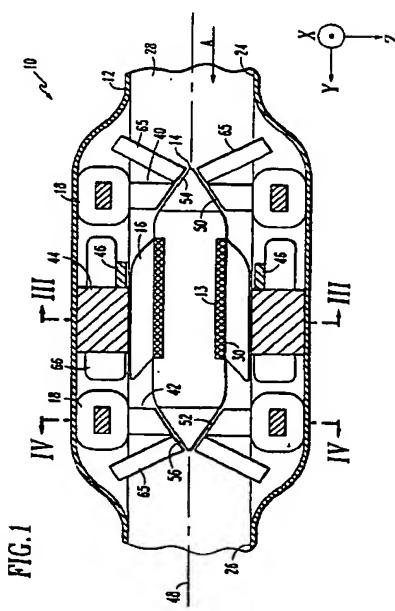


FIG.1

【図44A】

図43のステーターの第2の端部の好ましい実施例の等角図である。

【図44B】

図43の線44B-44Bに沿った端面図である。

【図45】

図38の好ましい実施例の好ましい流路を示す線図である。

【図46】

図39の好ましい実施例の軸受の幾つかの好ましい実施例の線図である。

【図2】

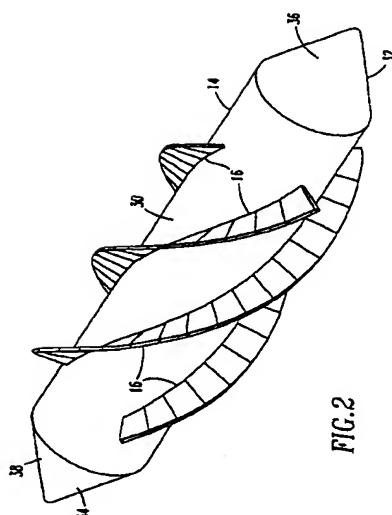


FIG.2

【図3】

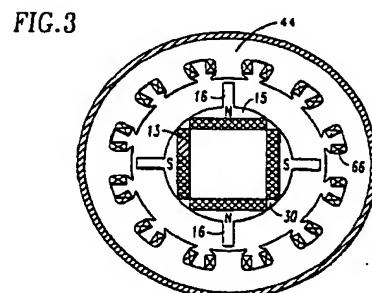


FIG.3

【図4】

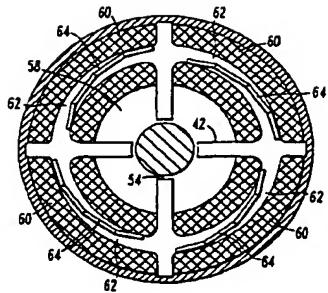


FIG.4

【図5】

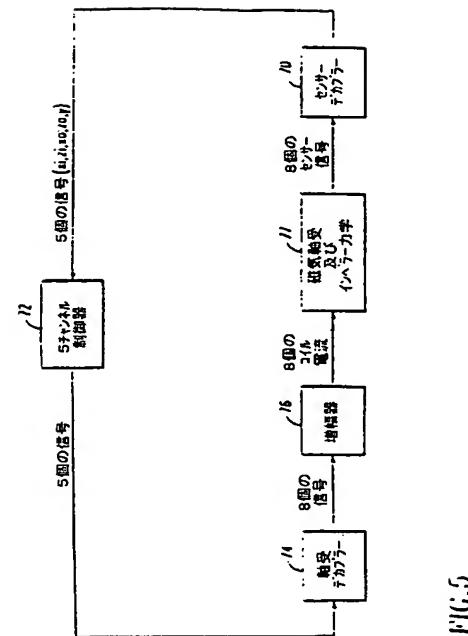


FIG.5

【図6】

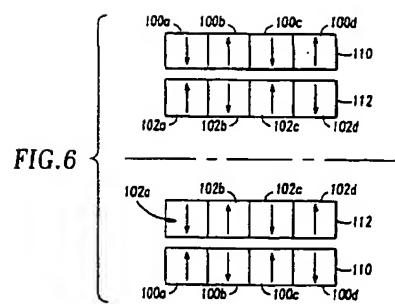


FIG.6

【図8】

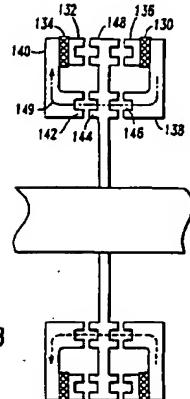


FIG.8

【図7】

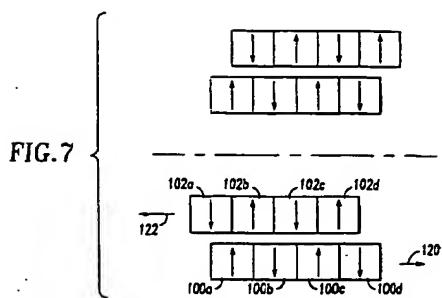


FIG.7

【図9】

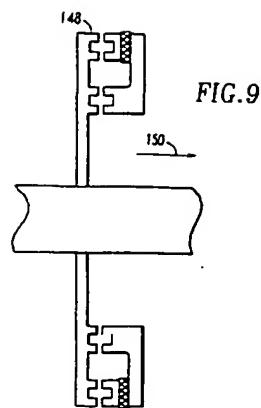


FIG.9

【図10】

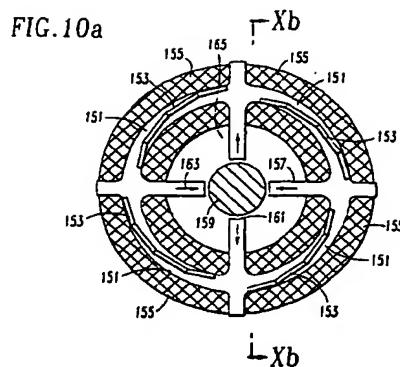


FIG.10a

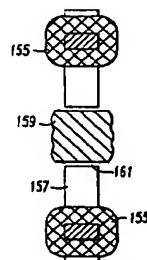


FIG.10b

【図11】

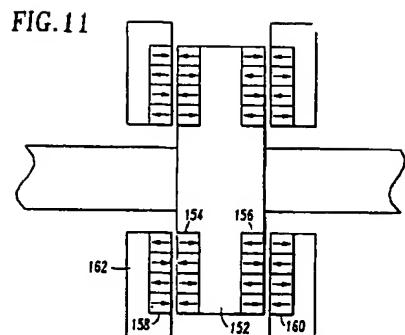


FIG.11

【図13】

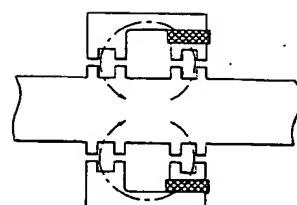


FIG.13

【図12】

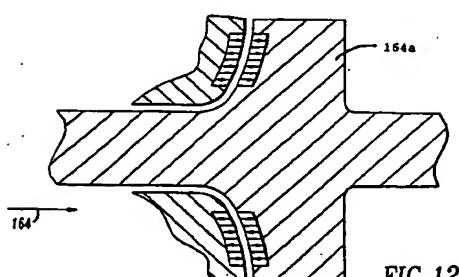


FIG.12

【図14】

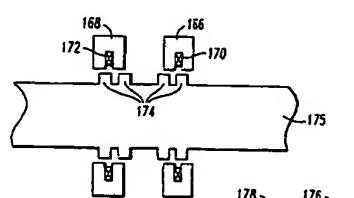


FIG.14

【図15】

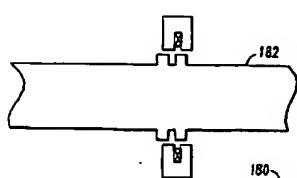


FIG.15

【図 1-6】

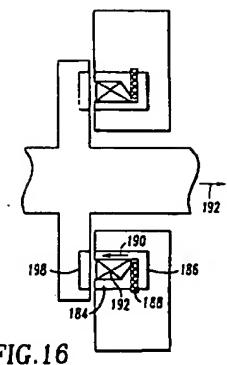


FIG. 16

【图17A】

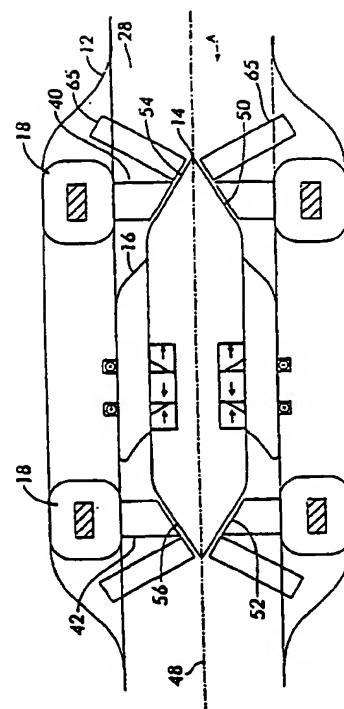


FIG. 17A

[图 17]

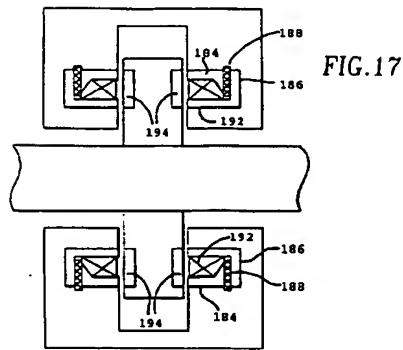
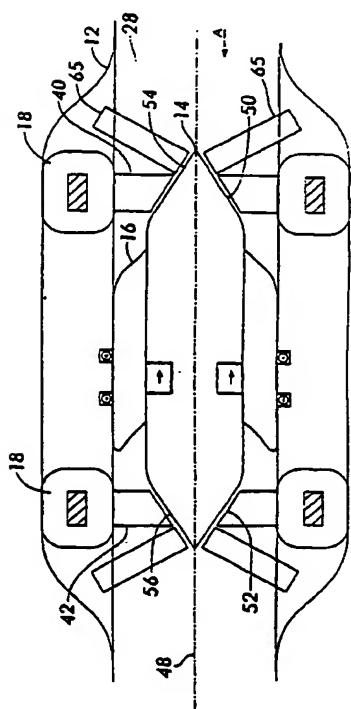


FIG. 17

FIG. 17B



[図17c]

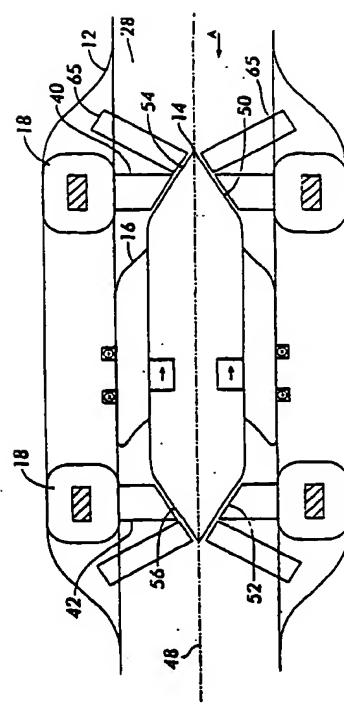


FIG. 17C

【图18】

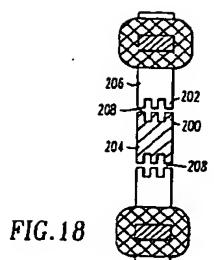


FIG.18

【图20】

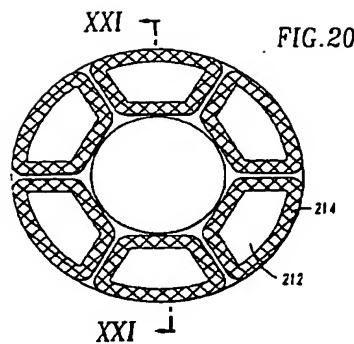


FIG.20

【图19】

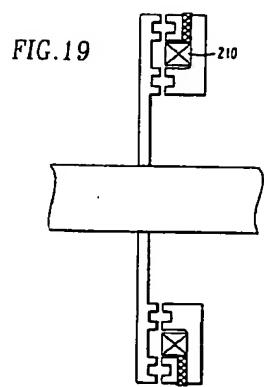


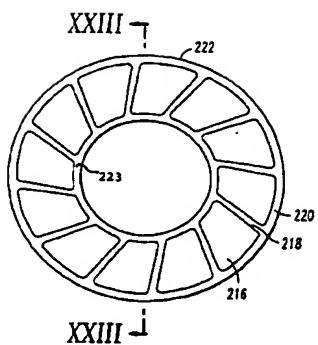
FIG.19

【图21】



FIG.21

【图22】



XXIII

【图24】

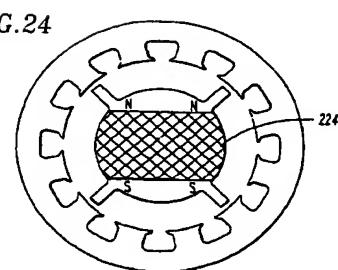


FIG.24

【图23】

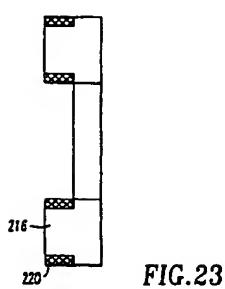


FIG.23

【图25】

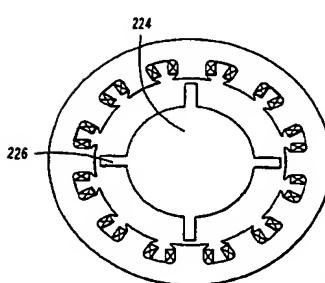


FIG.25

[図26]

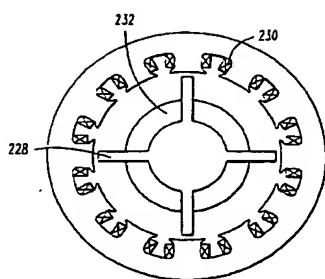


FIG. 26

〔图28〕

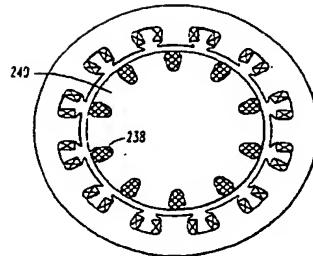


FIG. 28

【图27】

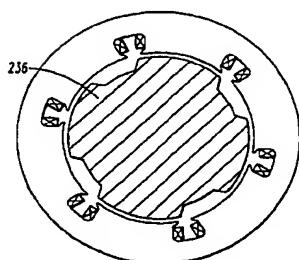


FIG.27

【図29】

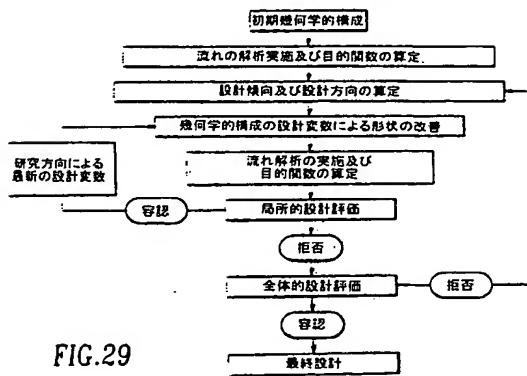


FIG.29

【图30】

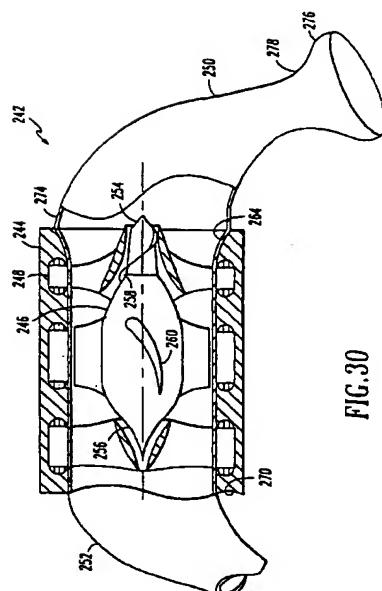


FIG. 30

【☒ 3 1】

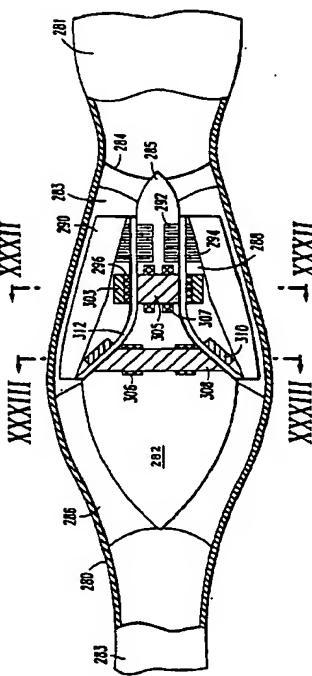
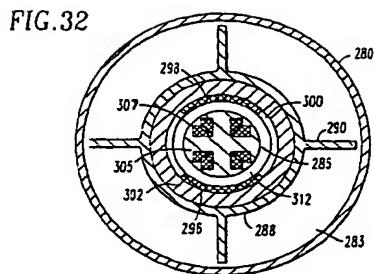


FIG. 31

〔图32〕



【图 3-3】

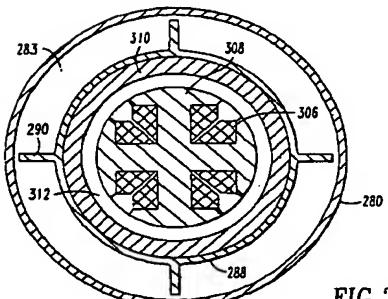


FIG.33

[图 3-4]

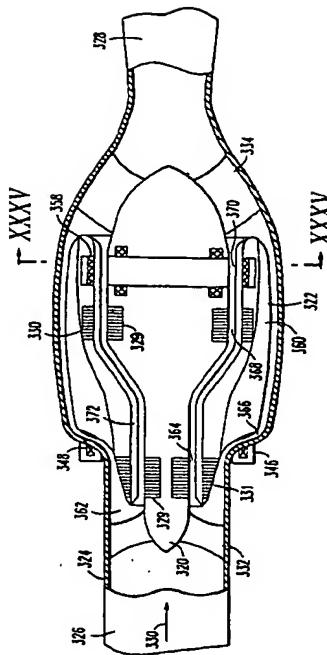


FIG. 34

[图 35]

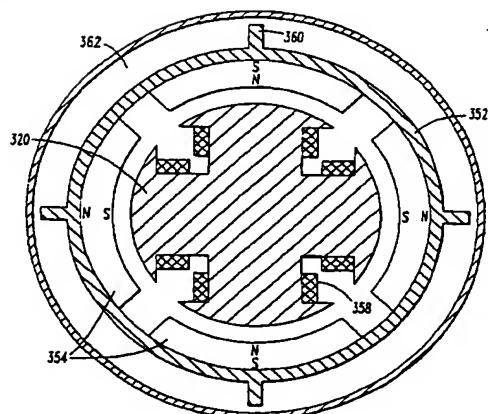


FIG. 35

[図37]

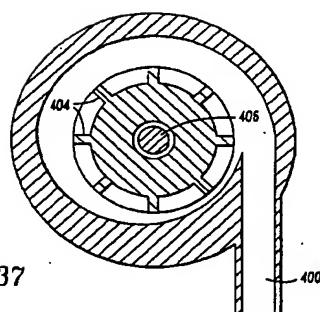


FIG.37

【图36】

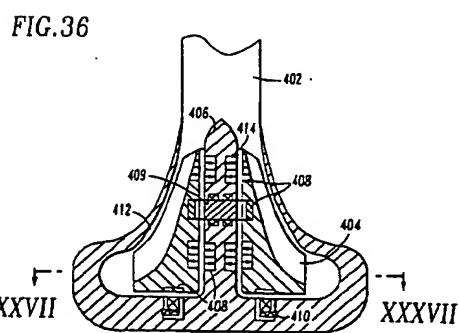


FIG. 36

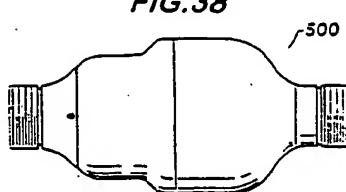


FIG. 38

[图 3.91]

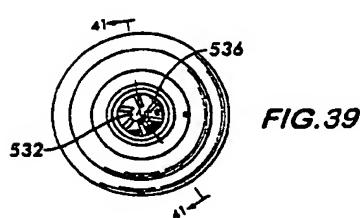


FIG. 39

[图 40]

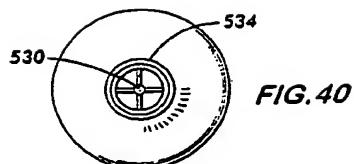


FIG. 40

〔图4-1〕

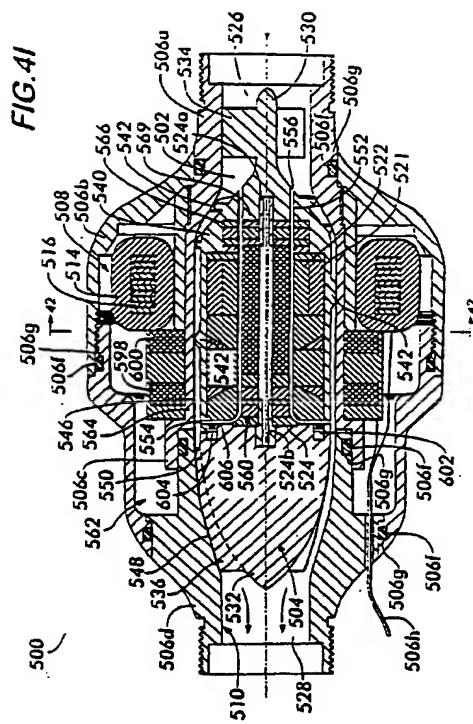


FIG. 4

【图 4-2】

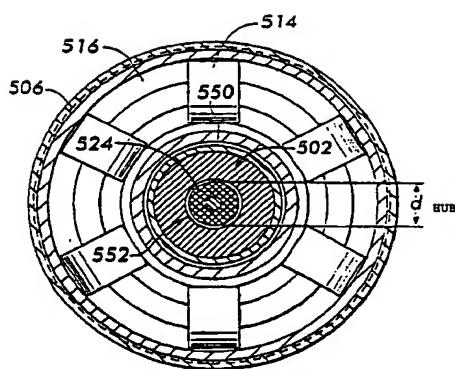


FIG. 42

【图4-3】

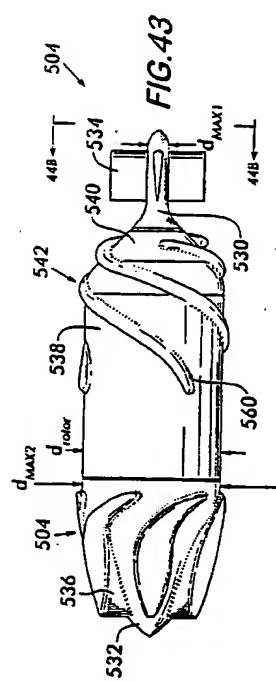


FIG. 43

[图44]



FIG. 44A FIG. 44B

[图45]

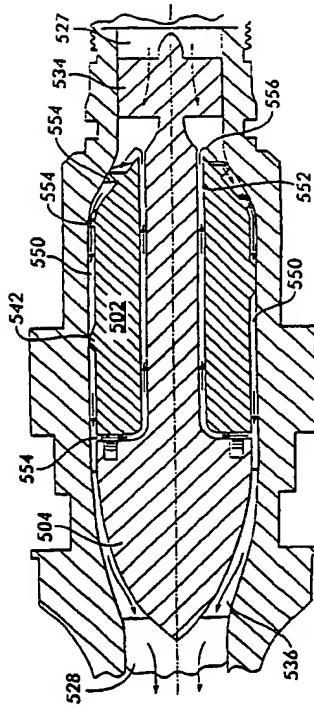
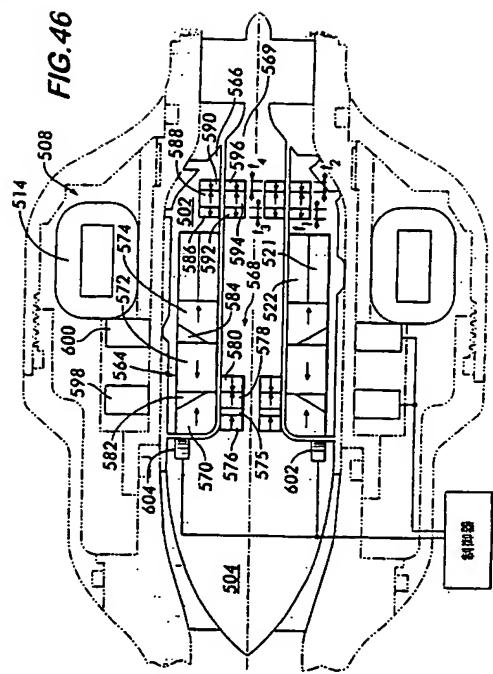


FIG. 45

[图46]



フロントページの続き

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	マーク(参考)
F 0 4 D 29/04		F 0 4 D 29/04	G
			J
<p>(81) 指定国 E P (A T, B E, C H, C Y, D E, D K, E S, F I, F R, G B, G R, I E, I T, L U, M C, N L, P T, S E), O A (B F, B J, C F, C G, C I, C M, G A, G N, G W, M L, M R, N E, S N, T D, T G), A P (G H, G M, K E, L S, M W, M Z, S D, S L, S Z, T Z, U G, Z W), E A (A M, A Z, B Y, K G, K Z, M D, R U, T J, T M), A E, A G, A L, A M, A T, A U, A Z, B A, B B, B G, B R, B Y, B Z, C A, C H, C N, C R, C U, C Z, D E, D K, D M, D Z, E E, E S, F I, G B, G D, G E, G H, G M, H R, H U, I D, I L, I N, I S, J P, K E, K G, K P, K R, K Z, L C, L K, L R, L S, L T, L U, L V, M A, M D, M G, M K, M N, M W, M X, M Z, N O, N Z, P L, P T, R O, R U, S D, S E, S G, S I, S K, S L, T J, T M, T R, T T, T Z, U A, U G, U Z, V N, Y U, Z A, Z W</p>			
<p>(72) 発明者 アンタキ, ジエイムズ・エフ アメリカ合衆国ペンシルベニア州15101ア リソンパーク・マウントロイヤルブルバ ード4373</p>			
<p>(72) 発明者 ベイデン, ブラドリー アメリカ合衆国カリフォルニア州93111サ ンタバーバラ・ウインザーコート861</p>			
<p>(72) 発明者 バーグリーン, グレゴリー アメリカ合衆国ペンシルベニア州15007ベ イカースタウン・メドウレーン6044</p>			
<p>(72) 発明者 グルーム, ネルソン・ジエイ アメリカ合衆国バージニア州23183ホワイ トマーシュ・ピーオーポツクス125</p>			
<p>F ターム(参考) 3H022 AA01 BA02 BA06 CA16 4C077 AA30 BB10 DD10 EE01 KK01</p>			

【要約の続き】

2次流路(552)を横切るラジアル軸受(560)の効率的な作動を許すに十分に小さいが2次流路(552)の適切なフラッシングを提供するに十分に大きい。

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/US00/18098

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER			
IPC(7) : F04B 17/00; F03B 13/00 US CL : 417/356, 354, 423.1, 423.12; 413/900 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC			
B. FIELDS SEARCHED			
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S. : 417/356, 354, 423.1, 423.12; 413/900			
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched			
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)			
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT			
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	
Y	US 5,527,159 A (BOZEMAN, Jr. et al) 18 June 1996, columns 1-20.	1, 14, 19, 26, 33, 36, 37	
Y	US 2,500,400 A (COGSWELL) 14 March 1950, column 2, line 40 - col. 10, line 29.	1, 14, 19, 26, 33, 36, 37	
A	US 4,779,614 A (MOISE) 25 October 1988, column 2, line 3- column 4, line 30.	1, 14, 19, 26, 33, 36, 37	
A	US 4,683,391 A (HIGUCHI) 28 July 1987, abstract, figures 1-15, columns 1-12.	1, 14, 19, 26, 33, 36, 37	
X Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.			
A	Special categories of cited documents:		
A	document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T"	later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
B	earlier document published on or after the international filing date	"X"	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
L	document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reasons (as specified)	"Y"	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
G	document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"Z"	document number of the same patent family
P	document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search 30 AUGUST 2000		Date of mailing of the international search report 18 OCT 2000	
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20231 Facsimile No. (703) 305-3230		Authorized officer JEFFREY PWU <i>Diane Smith f</i> Telephone No. (703) 308-7835	

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1998)*

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/US00/18098

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4,688,998 A (OLSEN et al) 25 August 1987, column 4, line 65-column 13, line 43.	1, 14, 19, 26, 33, 36, 37
A	US 4,763,032 A (BRAMM et al) 09 August 1998, abstract, figures 1-6.	1, 14

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1998)*